ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ТЕПЛОВОЗОВ И ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДОВ

*Рекомендовано
Экспертным советом Федерального учебно-методического объединения в системе среднего профессионального образования по укрупненной группе профессий, специальностей 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта» в качестве учебного пособия для использования в учебном процессе образовательных организаций и учреждений, реализующих программы СПО по специальности 23.02.06 «Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог».
Регистрационный номер экспертного заключения 1 от 27 декабря 2016 г.*

Москва
2017

УДК 621.313:629.424
ББК 31.261:39.235
Д14

Рецензент: главный инженер ремонтного локомотивного депо Брянск-2 *А.Н. Чурков*

Дайлидко А.А.

Д14 Электрические машины тепловозов и дизель-поездов: учеб. пособие. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2017. — 242 с.

ISBN 978-5-89035-995-7

Учебное пособие подготовлено в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом среднего специального образования специальности 23.02.06 «Техническая эксплуатация подвижного состава железных дорог» для базовой и углубленной подготовки.

Рассмотрены теория, принцип действия, устройство и режимы работы электрических машин как общего, так и тягового назначения, применяемых в ТПС. Приведена технология технического обслуживания этого оборудования.

Предназначено для студентов техникумов и колледжей железнодорожного транспорта. Может быть полезно для инженерно-технических работников локомотивного хозяйства, а также для локомотивных и ремонтных бригад.

УДК 621.313:629.424
ББК 31.261:39.235

ISBN 978-5-89035-995-7

Введение

Электрические машины применяются на всех видах автономного подвижного состава, к которому относятся тепловозы, дизель-поезда и рельсовые автобусы. Если в тепловозах с электрической передачей электрические машины используются в качестве тяговых генераторов, тяговых электродвигателей и вспомогательных электрических машин, то в тепловозах с гидравлической или механической передачами, а также в дизель-поездах и рельсовых автобусах — только в качестве вспомогательных электрических машин. В любом случае современный тяговый подвижной состав немыслим без электрических машин.

ГОСТ 2582-81 определяет методологию конструирования электрических машин, применяемых на тяговом подвижном составе (ТПС).

Большинство автономного тягового подвижного состава, работающего на магистральных железных дорогах мира, оборудовано электрическими передачами мощности. Поэтому в учебном пособии большое внимание уделено тяговым электрическим машинам, как генераторам, так и электродвигателям. Изучать только конструкцию тяговых электрических машин без изучения теоретических сведений об их характеристиках и процессах, происходящих при работе, немыслимо для подготовки современного специалиста по эксплуатации, обслуживанию и ремонту устройств автономного тягового подвижного состава.

Результативное изучение курса «Электрические машины тепловозов и дизель-поездов» может быть достижимо при условии наличия знаний по дисциплинам «Электротехника», «Материаловедение», «Техническая механика». Кроме того, в процессе изучения тяговых электрических машин необходимы также знания условных обозначений и умение читать сборочные чертежи. Это может обеспечить такая дисциплина, как «Инженерная графика». Поэтому, считая, что перечисленные дисциплины студентами освоены, автор приводит ряд положений из этих дисциплин как известную информацию.

Курс «Электрические машины тепловозов и дизель-поездов» является базой для изучения таких дисциплин, как «Электрическое оборудование тепловозов и дизель-поездов», «Электрические цепи тепловозов и дизель-поездов», «Электронные преобразователи тепловозов и дизель-поездов», «Вспомогательное оборудование тепловозов и дизель-поездов», «Основы технического обслуживания и ремонта тепловозов и дизель-поездов», «Техническая эксплуатация тепловозов и дизель-поездов», «Основы локомотивной тяги».

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

1.1. Основные понятия

В настоящее время практически ни один вид современного транспорта не обходится без электрических машин. Не являются исключением тепловозы, дизель-поезда и рельсовые автобусы.

Началом создания электрических машин следует считать открытие М. Фарадеем закона электромагнитной индукции и последующие работы в этой области Д. Максвелла, Э. Ленца, М.О. Доливо-Добровольского и др.

Большой вклад в развитие теории работы тяговых электрических машин внесли советские ученые А.Е. Алексеев, Б.П. Апаров, А.И. Вольдек, А.В. Иванов-Смоленский, М.П. Костенко, К.А. Круг, С.И. Курбатов, Л.М. Пиотровский и др.

Современный этап развития человеческой цивилизации немыслим без применения электрической энергии. Львиную долю электроэнергии потребляет железнодорожный транспорт.

Машины, совершающие преобразование механической энергии в электрическую или обратное преобразование, называются *электрическими машинами*. В отличие от других электромеханических преобразователей электрическая машина совершает непрерывный процесс преобразования энергии.

Генератором называют электрическую машину, преобразующую механическую энергию в электрическую. Для преобразования электрической энергии в механическую предназначена электрическая машина, называемая *электрическим двигателем* (*электродвигателем*). *Преобразователем* называют электрическую машину, преобразующую одну форму электрической энергии (величину напряжения переменного и постоянного тока, частоту, число фаз и т.п.) в другую.

Основное отличие электрических машин постоянного тока от других преобразователей в том, что они обратимы, т.е. одна и та же машина может работать и в режиме двигателя, и в режиме генератора.

Кроме того, существуют *электромашинные преобразователи*, которые преобразуют переменный ток в постоянный или переменный ток промышленной частоты в ток более высокой частоты. Электрические машины используют также для усиления мощности электрических сигналов — так называемые *электромашинные усилители*.

Синхронные компенсаторы используют повышения коэффициента мощности ($\cos\varphi$).

Неподвижная часть машины является *статором*, а вращающаяся — *ротором*. Такие машины называют одномерными. Если вращаются обе части машины, то такие машины называют двухмерными. Почти все выпускаемые промышленностью машины являются одномерными с цилиндрическим вращающимся ротором и внешним неподвижным статором. Находят применение также электрические машины, в которых ротор имеет форму диска. Такие машины называют торцевыми. У линейных двигателей ротор относительно статора совершает линейное движение или возвратно-поступательное.

Непременным условием преобразования энергии является изменение потокосцепления обмоток в зависимости от положения ее частей статора и ротора. Преобразование энергии в них осуществляется в магнитном поле.

На каждой электрической машине имеется металлическая паспортная табличка. На этой табличке указаны: завод-изготовитель, год выпуска, класс изоляции, масса машины и номинальные данные, характеризующие основные энергетические показатели и условия работы машины, на которые она рассчитана. Там же приведены и энергетические показатели машины: мощность, напряжение, ток, частота вращения, частота переменного тока, коэффициент полезного действия (КПД), число фаз, коэффициент мощности и режим работы (длительный, кратковременный и т.п.).

Тяговые машины характеризуются двумя режимами работы: часовым и продолжительным. *Часовой* называют мощность, с которой двигатель может работать в течение одного часа, а его обмотки за это время нагреваются под действием тока от температуры окружающей среды до предельно допустимой температуры. *Продолжительной* называют мощность, с которой двигатель может работать в течение длительного времени, и при этом температура нагрева его отдельных частей не превысит допустимую.

Трансформаторы не имеют вращающихся частей и являются статическими преобразователями электроэнергии переменного тока. Однако принцип действия трансформаторов и электрических машин одинаковый и основан на явлении электромагнитной индукции.

Классификация электрических машин производится по следующим признакам:

– по *назначению* — электродвигатели, генераторы, электромашинные и электромеханические преобразователи, компенсаторы;

– по *роду тока* — машины постоянного и переменного тока;

– по *принципу действия* — коллекторные и бесколлекторные. Коллекторные машины подразделяются на машины постоянного тока и универсальные, работающие как от сети постоянного тока, так и от сети переменного тока. Бесколлекторные машины — это машины переменного тока: синхронные и асинхронные;

– по *мощности* — микромашины, машины малой, средней и большой мощности (условно). При этом *номинальной мощностью* электрической машины называют мощность, на которую рассчитана данная машина по условиям нагрева и безаварийной работы в течение установленного срока службы машины. В реальных условиях машина может работать и при неноминальных условиях (уменьшенная или увеличенная мощность; напряжение и ток, отличающиеся от номинальных и т.д.). Однако при этом будут отличаться и энергетические показатели машины. При небольших нагрузках (меньше номинальных) будут меньше КПД и коэффициент мощности, а при нагрузках больше номинальных — увеличится нагрев машины, что может привести к преждевременному выходу из строя изоляции обмоток и, следовательно, всей машины.

Микромашины имеют мощность от долей ватта до 500 Вт. Эти машины работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной и повышенной (400—2000 Гц) частоты.

Машины малой мощности — мощностью от 0,5 до 10 кВт работают как на постоянном, так и на переменном токе нормальной или повышенной частоты.

Машины средней мощности — имеют мощность от 10 до нескольких сотен кВт, а машины большой мощности — свыше нескольких сотен кВт;

— по *частоте вращения* машины условно подразделяют на *тихоходные* с частотами вращения до 300 об/мин; *средней быстроходности* — 300—1500; *быстроходные* — 1500—6000; *сверхбыстроходные* — свыше 6000 об/мин.

Защита электрических машин от внешних воздействий осуществляется различными видами их конструктивных исполнений:

— *открытое* исполнение — машина не имеет специальных приспособлений, которые предохраняют от попадания внутрь посторонних предметов, а также от прикосновения обслуживающего персонала к токоведущим и вращающимся частям. На электровозах ВЛ80 всех индексов открытые асинхронные машины применяют в качестве привода компрессоров, вентиляторов;

— *защищенное* — машина имеет специальные приспособления, необходимые для циркуляции воздуха, охлаждающего машину — соответствующие крышки, кожухи, сетки и пр. Такие машины не имеют приспособлений, защищающих от дождя. Их применяют в качестве расщепителей фаз и других вспомогательных машин ТПС и устанавливают в кузовах;

— *брызгозащищенное* — машина обеспечена приспособлениями, защищающими машину от дождя и водяных брызг, падающих сверху или с любой из четырех сторон под углом до 45° к вертикали. Брызгозащищенные машины могут устанавливаться на открытом воздухе;

— *каплезащищенное* — машина защищена от попадания внутрь машины вертикально падающих капель;

— *водозащищенное* — машина недоступна проникновению внутрь струй воды любого направления (также и снизу) путем герметизации усиленными уплотнениями резиновыми прокладками и сальниками. Случайно попавшая в машину вода вытекает из нее или удаляется охлажденным воздухом;

— *пылезащищенное* — машина защищена от попадания внутрь пыли в опасных для нормальной работы количествах;

— *закрытые* — внутреннее пространство машины изолировано от внешней среды. Большинство вспомогательных машин, а также тяговые электродвигатели электровозов выполнены закрытыми;

— *герметичное* — машина выполняется с особо плотной изоляцией от окружающей среды, предотвращающей сообщение ее с внутренним пространством при определенной разности давлений

снаружи и внутри машины. В качестве примера можно привести масляный электронасос тягового трансформатора электровозов переменного тока;

— *взрывозащищенное* (взрывобезопасное) — машина может работать во взрыво- и пожароопасной среде.

Кроме того, машины могут иметь следующие специальные исполнения: влагостойкое, морозостойкое, тропическое и др.

1.2. Материалы для изготовления электрических машин

Материалы, применяемые в электромашиностроении, подразделяют на три категории: конструктивные, активные и изоляционные.

Конструктивные материалы применяют для изготовления частей и деталей машин, воспринимающих и передающих механические нагрузки (валы, станины, подшипниковые щиты, стояки и различные крепежные детали и т.д.). В качестве конструкционных материалов применяют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, а также пластмассы. Корпуса машин постоянного тока изготовляют из низколегированной стали, а валы — из высокопрочных конструкционных сталей.

Активные материалы могут быть двух видов: проводниковые и магнитные. В качестве проводниковых материалов используют *медь* и рафинированный *алюминий*. Медь, применяемая в качестве электрических проводников, не должна содержать больше 0,1 % примесей. Очень вредное воздействие оказывают на электропроводимость меди примеси висмута и сурьмы. Хотя медь значительно дороже алюминия, для изготовления обмоток тяговых машин используют практически только ее, так как она обладает более высокой (примерно в 1,6 раза) электропроводностью по сравнению с алюминием. Поэтому габаритные размеры электрических машин с алюминиевыми обмотками получаются больше, чем с медными, так как при одной и той же мощности требуется бóльшее сечение проводников, а это ведет к увеличению пазов якоря, габаритов обмоток возбуждения и т.д.

Для изготовления круглых и прямоугольных проводов обмоток электрических машин и трансформаторов применяют проводниковую медь высокой чистоты (99,95 %), получаемую в электролитических ваннах; она отличается весьма низким содержанием примесей.

Медные сплавы используют для изготовления вспомогательных токопроводящих частей (контактные кольца, коллекторные пластины, болты и т.д.).

В качестве магнитопроводов используют различные ферромагнитные материалы: электротехническую сталь, чугун, стальное литье, листовую и кованую сталь, специальные сплавы.

Физические свойства и сортамент *электротехнической стали* регламентированы ГОСТ 21427.0—75. В электрических машинах применяют электротехнические стали марок 1211—1213, 1311, 1411, 1412, 1511, 1512, 3411, 3413. Здесь первая цифра обозначает класс стали по структурному состоянию и виду прокатки: 1 — горячекатаная изотропная; 2 — холоднокатаная изотропная; 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой. Вторая цифра показывает содержание кремния: цифра 2 обозначает содержание кремния 0,8—1,8 %, цифра 3 — 1,8—2,8 %, цифра 4 — 2,8—3,8 %, цифра 5 — 3,8—4,8 %. Третья цифра указывает группу по основной нормируемой характеристике: 0 — удельные потери при магнитной индукции B = 1,7 Т и частоте 50 Гц; 1 — удельные потери при B = 1,5 Т и частоте 50 Гц; 2 — удельные потери при B = 1,0 Т и частоте 400 Гц; 6 — магнитную индукцию в слабых полях при напряженности поля 10 А/м. Четвертая цифра — порядковый номер стали.

При увеличении кремния ухудшаются механические свойства стали, так как увеличивается ее хрупкость. В то же время кремний улучшает магнитные свойства: во-первых, он способствует переводу имеющегося в стали углерода из цементита в графит, что приводит к снижению потерь на гистерезис, и, во-вторых, увеличивает электрическое сопротивление стали, что уменьшает потери на вихревые токи.

Обычно применяют листовую электротехническую сталь толщиной 0,5 и 0,35 мм, а также в виде ленты, намотанной в рулоны.

По способу обработки различают горячекатаную и холоднокатаную сталь. Горячекатаная сталь имеет одинаковое магнитное сопротивление во всех направлениях прокатки, а холоднокатаная — имеет меньшее магнитное сопротивление вдоль направления прокатки.

Для изготовления магнитопроводов современных асинхронных электродвигателей с высотой оси до 180 мм и статоров синхронных машин используют сталь марки 2013, при бóльших высо-

тах осей вращения — марок 2212, 2312 и 2421. Сталь 2012 обладает высокой магнитной проницаемостью и сравнительно низкими потерями на перемагничивание. После штамповки листы подвергают рекристаллизационному отжигу (для устранения ухудшения магнитных свойств стали в результате образования наклепа при технологических операциях) и оксидации для создания изоляционного слоя. Стали марок 2212, 2321 и 2411 имеют электроизоляционное покрытие и не требуют отжига. Применение этих сталей, имеющих низкие потери, повышает КПД и, кроме того, упрощает технологию изготовления, так как они не требуют отжига листов большого размера.

В машинах постоянного тока для сердечников якорей машин с высотой оси вращения до 200 мм применяют сталь марок 2013. Для снятия наклепа после штамповки сталь отжигают, а затем изолируют. При бóльших высотах осей вращения используют стали марок 2112, 2212, 2312, 2411.

При изготовлении магнитопроводов трансформаторов используют холоднокатаные анизотропные стали марок 3412—3413 с изоляционным покрытием, после штамповки сталь отжигают. Применение холоднокатаной анизотропной стали усложняет конструкцию и технологию изготовления магнитопроводов, так как при этом требуется исключить прохождение магнитного потока поперек прокатки или, по крайней мере, уменьшить длину участков, где это необходимо. По тем же причинам во вращающихся электрических машинах из-за более сложной конфигурации их магнитопроводов такая сталь находит ограниченное применение — только в очень крупных машинах для изготовления сегментов, из которых собирают сердечники статора и ротора (стали марок 3411—3413).

Полюсы машин постоянного тока и синхронных машин собирают из листов низкоуглеродистой конструкционной стали толщиной 1—2 мм или электротехнической стали 3411. Корпуса машин постоянного тока изготовляют из стального литья или путем сварки из листовой низколегированной магнито-мягкой стали. Стальное литье применяют также для изготовляют станин и роторов синхронных машин. Валы машин выполняют из высокопрочных конструкционных сталей с добавкой хрома, никеля и т.п. Особенно сложно изготовлять роторы турбогенераторов, в которых сталь

одновременно должна обладать высокой прочностью и хорошей магнитной проницаемостью.

Изоляционные материалы, применяемые для изоляции токоведущих частей электрических машин, могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Газообразными считают воздух и водород, которые являются изоляторами и в то же время охлаждают узлы и детали электрических машин. В качестве жидких диэлектриков применяют трансформаторное масло, хорошо охлаждающее мощные трансформаторы. Твердые изоляционные материалы можно разделить на четыре группы:

– естественные органические волокнистые материалы — шелк, хлопчатая бумага, материалы на основе древесной целлюлозы;

– неорганические материалы — слюда, стекловолокно, асбест;

– различные синтетические материалы в виде смол, пленок, листового материала и т.д.;

– различные эмали, лаки, компаунды на основе природных и синтетических материалов.

Пропитка компаундами служит той же цели, как и пропитка лаками. Отличие заключается только в том, что компаунды не имеют летучих растворителей, а представляет собой консистентную массу, которая при нагревании размягчается, сжижается и способна под давлением проникать в поры изоляции, обеспечивая более плотное заполнение пор изоляции.

Нагревостойкость изоляции является основным требованием, определяющим надежность работы и срок службы электрической машины, который должен составлять 15—20 лет. При нагреве изоляции возникают электрохимические и термические процессы, приводящие к ее старению, т.е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Международные и отечественные стандарты классифицируют изоляционные материалы по семи классам со следующими предельно допустимыми температурами (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Классы изоляционных материалов по нагревостойкости

Класс изоляции	YY	A	E	B	F	H	C
Предельно допустимая температура	90 °C	105 °C	120 °C	130 °C	155 °C	180 °C	Более 180 °C

Требования к нагревостойкости заключаются в том, чтобы изоляция при повышении температур не меняла своих свойств.

К классу Y относятся не пропитанные жидкими диэлектриками волокнистые материалы из хлопчатой бумаги, целлюлозы, натурального шелка, древесины и синтетических материалов, таких как полиэтилен, полистирол, поливинилхлорид и др. Этот класс изоляции в тяговых электрических машинах не применяется.

В класс А входят материалы класса Y, пропитанные изоляционным составом или погруженные в жидкие диэлектрики (различные лакоткани, ленты, электротехнический картон, гетинакс, текстолит, а также волокнистые материалы из хлопчатой бумаги, целлюлозы и шелка, пропитанное дерево, древесные слоистые пластики, некоторые синтетические пленки, изоляция проводов типа ПБД, ПЭВЛО, ПЭЛШО и другие из хлопчатобумажной ткани, шелка и лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭЛ, ПЭМ, ПЭЛР и ПЭВД и др.). Изоляция класса А применяется в трансформаторах и в электрических машинах мощностью свыше 100 кВт.

Класс Е включает в себя эмальпровода и электрическую изоляцию на основе поливинилацеталевых (винифлекс, металвин), полиуретановых, эпоксидных, полиэфирных (лавсан) смол и других синтетических материалов с аналогичной нагревостойкостью. Класс Е включает в себя провода с изоляцией типа ПЛД, ПЭПЛО из лавсана, эмалевая изоляция проводов типа ПЭВВТЛ, ПЭВТЛК и другие на основе полиуретановых и полиамидных смол.

К классу В относятся изоляционные материалы на основе тонкой щипаной слюды (микалента, микафолий, миканит), неорганических диэлектриков (слюда, асбест, стекловолокно) и клеящих, пропиточных и покровных лаков и смол повышенной нагревостойкости органического происхождения, причем содержание органических веществ по массе не должно превышать 50 %. Сюда также относится слюдинитовые материалы, в основе которых лежит непрерывная слюдинитовая лента из пластинок слюды размерами до нескольких миллиметров и толщиной в несколько микрон, а также полиэфирные смолы на основе фталевого ангидрида, полихлортрифторэтилен (фторопласт-3), некоторые полиуретановые смолы и др. Изоляция класса В широко применяется в тяговых электрических машинах.

Класс F объединяет изоляционные материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, но с применением органических ла-

ков и смол, модифицированных кремнийорганическими (полиорганосилоксановыми) и другими смолами с высокой нагревостойкостью или же с применением других синтетических смол с соответствующей нагревостойкостью (полиэфирные смолы на основе изо- и терефталевой кислот и др.).

К классу H относится изоляция на основе слюды, стекловолокна и асбеста в сочетании с кремнийорганическими (полиорганосилоксановыми), полиорганометаллосилоксановыми и другими нагревостойкими смолами. С применением этих смол изготовляют миканиты и слюдиниты, а также стекломиканиты, стеклоткани и стеклотекстолиты. К этому классу относится изоляция на основе политетрафторэтилена (флоропласт-4).

К классу изоляции C принадлежит слюда, кварц, стекловолокно, стекло, фарфор и другие керамические материалы, применяемые без органических связующих или с неорганическими связующими. Связующими служат кремнийорганические и элементоорганические лаки и смолы.

Наибольшей нагревостойкостью обладают стекловолокнистые и слюдяные материалы, содержащие кремнийорганические связующие и пропитывающие составы, эмалевая изоляция проводов на основе кремнийорганических лаков и синтетической пленки «Изофлекс», «Имидофлекс» и др. Они отличаются высокой электрической и механической прочностью и влагостойкостью.

В настоящее время стоимость изоляции составляет 30—70 % от стоимости всех материалов, идущих на изготовление электрической машины.

1.3. Потери электроэнергии, КПД, нагрев и охлаждение электрических машин

Мощность электрических машин. Потребляемая мощность машин постоянного тока определяется произведением тока на напряжение:

$$P = UI, \tag{1.1}$$

— для однофазных машин переменного тока

$$P = UI\cos\varphi, \tag{1.2}$$

где U и I — эффективные значения тока и напряжения;

$\cos\varphi$ — коэффициент мощности;

— для трехфазных машин переменного тока

$$P = 3U_ф I_ф \cos\varphi, \qquad (1.3)$$

где $U_ф$ и $I_ф$ — фазовый ток и фазовое напряжение;

φ — угол сдвига фаз между фазовым током и фазовым напряжением.

Мощность трехфазной машины также может быть выражена через линейный ток $I_л$ и линейное напряжение $U_л$:

$$P = \sqrt{3} U_л I_л \cos\varphi. \qquad (1.4)$$

Подводимая к машине мощность равна:

— для генератора

$$P_{1ген} = 0{,}105 M_1 n \quad \text{или} \qquad (1.5)$$

$$P_{1ген} = M_1 \omega; \qquad (1.6)$$

— для двигателя

$$P_{1дв} = UI. \qquad (1.7)$$

Выходная мощность машины равна:

— для генератора

$$P_{2ген} = UI; \qquad (1.8)$$

— для двигателя

$$P_{2дв} = 0{,}105 M_2 n_2. \qquad (1.9)$$

Потери в электрических машинах. При работе электрической машины в режиме генератора или двигателя часть потребляемой ее энергии бесполезно теряется в виде тепла. Мощность потерянной энергии называют *потерями мощности* или просто *потерями.*

Электрические потери являются переменными, так как зависят от тока нагрузки. Их рассчитывают по формуле Джоуля-Ленца

$$P_{эл} = I^2 r, \qquad (1.10)$$

где I — ток электрической машины, А;

r — активное сопротивление обмотки, Ом.

Потери в обмотке якоря

$$P_a = I_a^2 r, \qquad (1.11)$$

где r — сопротивление обмоток цепи якоря.

Потери в обмотках возбуждения главных полюсов

$$P_в = U_в I_в. \qquad (1.12)$$

Потери в переходных сопротивлениях щеточных контактов

$$P_{щ} = U_{щ} I_{щ}. \qquad (1.13)$$

Суммарные электрические потери

$$P_{эл} = P_a + P_в + P_{щ}. \qquad (1.14)$$

Магнитные потери — это потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием сердечников.

Потери на гистерезис возникают при циклическом перемагничивании, которое происходит в трансформаторах и в зубцовым слое электрических машин. В этом случае вектор магнитной индукции изменяется от нуля до максимального значения.

При вращательном перемагничивании стали также имеют место потери на гистерезис. Индукция в сердечниках машин обычно составляет меньше 1,5 Тл. Опытным путем установлено, что потери при вращательном перемагничивании больше в среднем в 1,8 раза, чем при циклическом перемагничивании.

При перемагничивании стали в ней индуктируется ЭДС, направление которой определяется по правилу «правой руки». ЭДС создает такого же направления токи, которые называют вихревыми. Вихревые токи способствуют нагреванию стали. Для уменьшения этих потерь элементы магнитопроводов собирают из отдельных листов, изолированных друг от друга.

На вращающемся якоре имеются пазы и зубцы. Вследствие этого возникают дополнительные потери в сердечниках полюсов машин постоянного тока.

Все потери в стали суммируются.

Механические потери $P_{мех}$ — это потери от трения в подшипниках $P_п$, трения щеток о коллектор $P_к$ и потери на вентиляцию $P_{вен}$

$$P_{мех} = P_п + P_к + P_{вен}. \qquad (1.15)$$

Добавочные потери $P_{доб}$ зависят от значения основного магнитного потока машины и вызваны зубчатым строением сердечников. К ним относятся потери от вихревых токов в меди обмоток и др. Добавочные потери учесть почти невозможно, но они небольшие, и на основании опытных данных их обычно принимают равными 1 % номинальной мощности.

Полные или суммарные потери

$$\Delta P = P_{эл} + P_м + P_{мех} + P_{доб}. \qquad (1.16)$$

Сумму магнитных и механических потерь составляют потери холостого хода

$$P_0 = P_м + P_{мех}. \qquad (1.17)$$

Коэффициент полезного действия определяется как отношение полезной или отдаваемой (выходной) мощности машины P_2 к потребляемой (подводимой) мощности P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ или в \%} \qquad (1.18)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \text{ \%}. \qquad (1.19)$$

В том числе:

– для генератора (с учетом потерь ΔP)

$$\eta = \frac{P_2}{UI + \Delta P} = \frac{UI}{UI + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{UI + \Delta P}; \qquad (1.20)$$

– для двигателя (с учетом потерь ΔP)

$$\eta = \frac{UI - \Delta P}{UI} = 1 - \frac{\Delta P}{UI}. \qquad (1.21)$$

Электрические машины имеют самый высокий КПД среди других машин. Так, у машин постоянного тока мощностью от 1 до 100 кВт КПД составляет 0,7—0,9, свыше 100 кВт — 0,9—0,97.

Нагрев электрических машин. Как отмечалось выше, все потери энергии в электрической машине преобразуются в теплоту Q: одна часть теплоты Q_1 расходуется на повышение температуры машины, а другая часть Q_2 — отдается в окружающую среду

$$Q = Q_1 + Q_2. \qquad (1.22)$$

Для анализа процесса нагревания предположим, что нагрев происходит равномерно по всему объему машины, а рассеивание теплоты происходит равномерно со всей поверхности.

Составим уравнение нагревания, для чего рассмотрим тепловой баланс. Количество теплоты Q, выделяемой в машине за бесконечно малый промежуток времени dt будет Qdt. Эта теплота, как было сказано выше, частично остается в машине и частично отдается в окружающую среду.

Пусть за время dt температура машина массой G повысилась на $d\tau$, тогда количество теплоты, поглощаемой машиной, составит $Gc\,d\tau$, где c — удельная теплоемкость, т.е. количество теплоты, необходимой для нагревания 1 кг вещества на 1 °С.

Если за время dt превышение температуры машины над температурой окружающей среды составило τ, то количество теплоты, отдаваемое в окружающую среду, будет $S\lambda\tau dt$, где S — площадь тела и λ — коэффициент теплоотдачи с поверхности, т.е. количество теплоты, рассеиваемое с единицы поверхности машины в 1 с при превышении температуры на 1 °С.

В соответствии с законом сохранения энергии составим уравнение теплового баланса

$$Q\,dt = Gc\,d\tau + S\lambda\tau\,dt. \qquad (1.23)$$

В начальный период времени температура машины и окружающей среды одинаковы ($\tau \approx 0$). При дальнейшей работе нагрев машины увеличивается, при этом часть теплоты отдается в окружающую среду. И, наконец, наступает такой момент, когда дальнейшее увеличение температуры нагрева машины прекращается и вся выделенная теплота будет отдаваться в окружающую среду. Это — режим теплового равновесия ($Gc\,d\tau = 0$).

$$Q\,dt = S\lambda\tau_у\,dt, \qquad (1.24)$$

$$Q = S\lambda\tau_у, \qquad (1.25)$$

где $\tau_у$ — установившаяся температура перегрева машины.

Подставив значение (1.25) в (1.24), получим

$$S\lambda\tau_у = Gc\,d\tau + S\lambda\tau\,dt. \qquad (1.26)$$

Решая уравнение (1.26) при нулевых начальных условиях, получим

$$\tau = \tau_у\,(1 - e^{-t/T}), \qquad (1.27)$$

где $e = 2{,}718$ — основание натуральных логарифмов;

T — постоянная времени нагревания машины, $T = Gc/S$ — представляет собой время, в течение которого машина нагревалась бы до наибольшей установившейся температуры, если бы теплота не рассеивалась в окружающую среду.

Графически T определяется отрезком АВ (рис. 1.1). Зависимость $\tau = f(t)$ представляет собой экспоненту *1* (кривая 0*а*). Экспонента показывает, что машина достигает установившегося значения температуры перегрева лишь по истечении длительного времени. Тео-

ретически тело достигает установшейся температуры по истечении бесконечно большого времени. Практически считают, что тепловой режим становится установившимся по истечении длительного времени, т.е. при (4–5)T.

Если отключить машину от сети, то ее нагревание прекратится, и уравнение теплового баланса примет вид

$$0 = Gc\,d\tau + S\lambda\tau\,dt \text{ или}$$

$$-Gc\,d\tau = S\lambda\tau\,dt. \quad (1.28)$$

Решая уравнение (1.28), получим

$$\tau = \tau_у\, e^{-t/T}. \quad (1.29)$$

Из уравнения (1.29) видно, что остывание машины также происходит по экспоненциальному закону (рис. 1.1, кривая *2*).

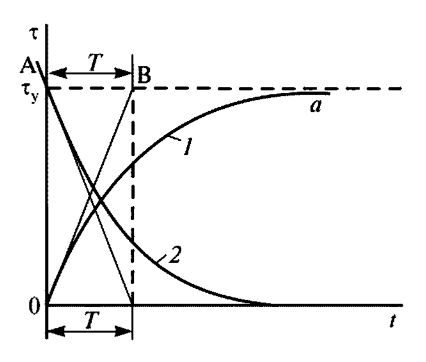


Рис. 1.1. Кривые нагрева и охлаждения электрической машины

Процессы нагрева и охлаждения машин протекают сравнительно медленно. Так, постоянные времени нагрева некоторых вспомогательных машин ЭПС лежат в пределах от 0,5 до нескольких часов.

Из-за низкой теплопроводности изоляции обмоток электрических машин возможно некоторое отличие теоретического и действительного изменения процесса нагрева обмоток в начале нагревания.

Нагревание электрических машин существенно влияет на их долговечность. Электрические устройства ЭПС рассчитывают на срок службы от 10 до 30 лет. Срок службы машины определяется состоянием изоляции ее обмоток. Как указывалось выше, электроизоляционные материалы делят на классы нагревостойкости. В электрических машинах ТПС применяют изоляцию классов B, F, H, C. Каждому классу соответствует определенная предельно допустимая температура нагрева. Если температура нагрева ее изоляции не превышает предельно допустимого значения, то машина может работать в течение длительного времени. Установлено, что превышение допустимой температуры изоляции на 8 °C снижает

ее срок службы примерно вдвое (правило восьми градусов). Температуру окружающей среды принимают равной +40 °С. При расчетах срока службы за условную температуру окружающей среды принимают +25 °С.

Охлаждение электрических машин. Как указывалось выше, все потери электрической машины в конечном счете превращаются в тепловую энергию. Охлаждение электрической машины может быть естественным и искусственным.

Естественное охлаждение, в свою очередь, подразделяют на охлаждение за счет теплопроводности и охлаждение за счет конвекции.

Теплопроводность — это передача тепла внутри твердого тела от более нагретых слоев менее нагретым. Например, передача тепла от обмоток через пазовую часть сердечнику статора, а от сердечника — корпусу.

Конвекция — это перенос тепла потоками воздуха. Частицы воздуха, омывая нагретые части машины, нагреваются и поднимаются вверх, уступая место менее нагретым частицам. Такое охлаждение применяется или в машинах малой мощности, или в машинах очень большой мощности.

Для более интенсивного охлаждения применяют специальные устройства — *вентиляторы*, создающие поток воздуха внутри машины. В зависимости от места установки этих вентиляторов и способа их вращения различают системы независимой вентиляции, самовентиляции и смешанной вентиляции. При независимой вентиляции вентилятор устанавливают вне вентилируемой им машины (чаще всего в кузове электровоза) и приводят его во вращение приводным электродвигателем.

Вспомогательные электрические машины ЭПС имеют сравнительно небольшую мощность, а также мало изменяющуюся частоту вращения. Охлаждение таких машин осуществляется встроенным вентилятором, т.е. применяется самовентиляция. Вентилятор обычно насаживают на вал ротора.

Контрольные вопросы

1. Какие машины называют электрическими?

2. Чем отличаются электрические машины от других электромеханических преобразователей?

3. Что указывают в табличке, расположенной на корпусе машины?

4. Какую функцию выполняют преобразователи?

5. Как классифицируют электрические машины?

6. Как классифицируют материалы, применяемые в электромашиностроении?

7. Какие проводниковые материалы применяют в электрических машинах?

8. Как классифицируют изоляционные материалы международные стандарты?

9. Какой класс изоляционных материалов обладает наибольшей нагревостойкостью?

Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Классификация электрических машин постоянного тока

Электрические машины постоянного тока тягового подвижного состава можно классифицировать по выполняемым функциям: тяговые генераторы и электродвигатели, преобразователи и вспомогательные машины. Преобразователи также относят к вспомогательным машинам.

Тяговые двигатели по роду тока подразделяются на двигатели постоянного, пульсирующего и переменного тока. В качестве электродвигателей переменного тока на ТПС используются асинхронные и вентильные двигатели. К вспомогательным машинам тепловозов относятся возбудители, вспомогательные генераторы, стартер-генераторы, электродвигатели приводов топливо- и маслоподкачивающих насосов, компрессоров, вентиляторов.

Характерным признаком машин постоянного тока является наличие у них коллектора, который является механическим преобразователем: у генераторов коллектор преобразует переменную ЭДС, индуктируемую в обмотке якоря, в постоянную, а в электродвигателях — изменяет направление тока в проводниках обмотки якоря при переходе их из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

2.2. Принцип действия генераторов и электродвигателей

Принцип действия электрических машин основан на явлении электромагнитной индукции.

Простейший *генератор переменного тока* (рис. 2.1) представляет собой виток *abcd*, вращающийся в магнитном поле, создаваемом электромагнитами *N* и *S*. Концы витка *a–d* присоединены к двум кольцам *1'* и *2'*, вращающимся с той же частотой, что и виток. На кольца наложены щетки *1* и *2*, к которым присоединена лампочка — нагрузка.

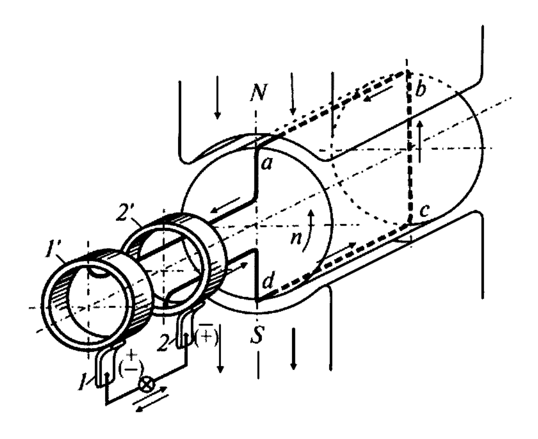


Рис. 2.1. Простейшая машина переменного тока:
1, *2* — щетки; *1'*, *2'* — кольца

Виток, вращаясь с равномерной скоростью, пересекает магнитные силовые линии, причем чем ближе к горизонтальной плоскости витка, тем меньшее количество магнитных силовых линий будет пересекаться его сторонами. Следовательно, индуктируемая ЭДС будет уменьшаться. В горизонтальной плоскости она будет равна нулю. При дальнейшем вращении сторона витка, расположенная под северным полюсом, будет перемещаться под южным полюсом, но в противоположном направлении, чем под северным. Поэтому направление ЭДС изменится на противоположное, как и магнитной индукции *B* (рис. 2.2). Таким образом, в рассматриваемом вит-

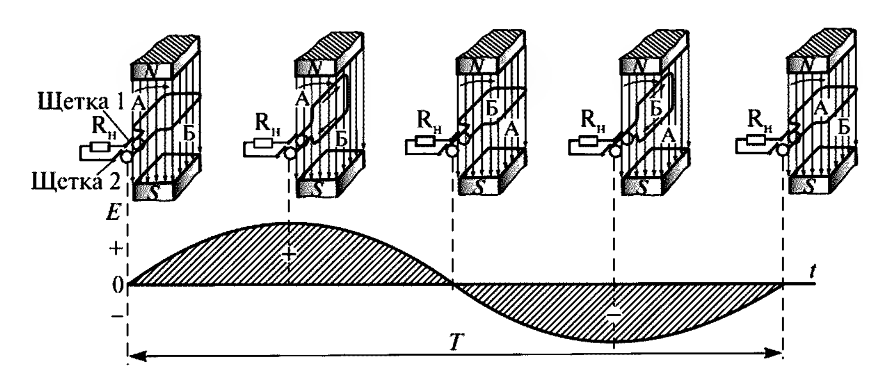


Рис. 2.2. Кривые ЭДС генератора переменного тока

ке, вращающемся в магнитном поле, индуктируется переменная во времени ЭДС, изменяющая свое направление дважды за один его оборот. Эта ЭДС зависит от магнитной индукции B, длины проводника l и скорости перемещения проводника в магнитном поле v:

$$E_{пр} = Blv. \tag{2.1}$$

По контуру витка ЭДС складываются, следовательно, ЭДС витка будет

$$E_{пр} = 2Blv. \tag{2.2}$$

Направление ЭДС изменяется. И точно так же будет изменять свое направление получаемый при этом ток, протекающий по внешней сети. Такой ток называется переменным и характеризуется периодом T и частотой f, которая определяется по формуле

$$f = \frac{1}{T} = \frac{pn}{60}, \tag{2.3}$$

где p — число пар полюсов;
n — частота вращения, об/мин;
60 — число секунд в минуте.

Часть электрической машины, в обмотках которой индуктируется ЭДС, называется *якорем.* В машинах постоянного тока якорь является ротором. Если кольцо разрезать на два полукольца (рис. 2.3), изолировать их друг от друга и подключить к ним наш виток, то во внешней цепи потечет ток одного направления (рис. 2.4). Получили механический выпрямитель, который называется *коллектором.* Рассмотрим этот процесс.

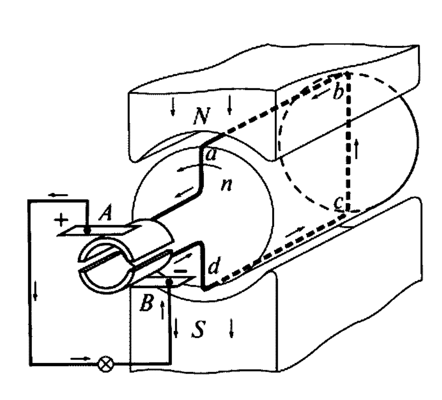


Рис. 2.3. Простейшая машина постоянного тока:
A и *B* — щетки; *ab*, *cd* — стороны рамки

Щетки на коллекторе устанавливают так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда индуктируемая ЭДС в витке равна нулю. В этом случае при вращении витка в нем будет индуктироваться переменная ЭДС, но каждая щетка будет контактировать только с той коллекторной пластиной и соответ-

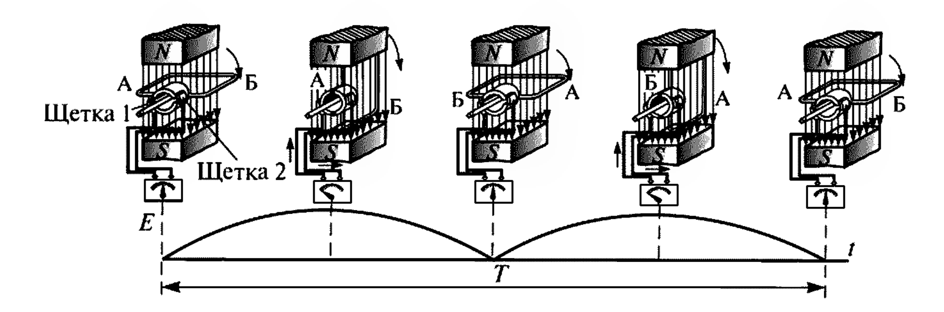


Рис. 2.4. Кривые тока во внешней цепи генератора постоянного тока

ственно с тем проводником, который находится под определенным полюсом. Так, например, щетка 1 будет всегда соединена с проводником, находящимся под северным полюсом, а щетка 2 — с проводником, находящимся под южным полюсом. Так как на вращающей части машины — роторе находится не один виток, а множество, то витки превращаются в обмотку ротора, а полукольца — в коллекторные пластины. Для сглаживания пульсации выпрямленного тока необходимо увеличить количество коллекторных пластин.

Направление ЭДС определяют по правилу «правой руки» (рис. 2.5, *а*). Правую руку надо расположить так, чтобы магнитные силовые линии были направлены перпендикулярно ладони, а отогнутый на 90° большой палец был направлен по векто-

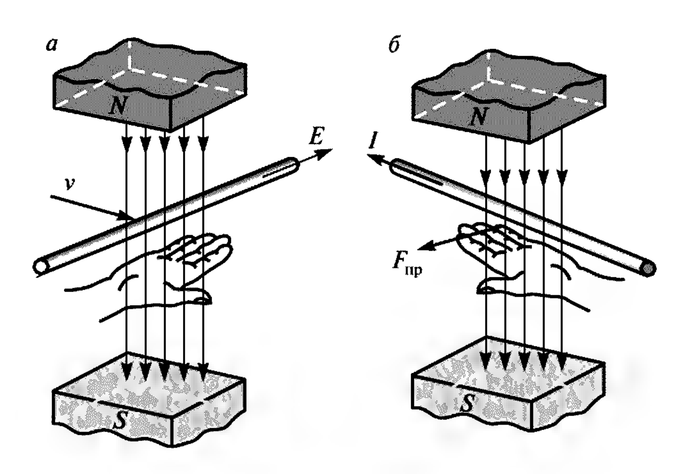


Рис. 2.5. Правила правой (*а*) и левой (*б*) руки

ру скорости, тогда четыре вытянутых пальца покажут направление ЭДС.

Простейший двигатель. Если к обмотке якоря (в нашем случае к витку) подвести постоянный ток от внешнего источника, то образуется магнитное поле якоря (витка), которое взаимодействует с магнитным полем полюсов, создавая электромагнитные силы $F_{пр}$:

$$F_{пр} = B l I_a. \tag{2.4}$$

Пара сил $F_{пр}$ образуют с диаметром якоря D_a момент $M_{эм}$, равный

$$M_{эм} = F_{пр} D_a = B l I_a D_a. \tag{2.5}$$

Якорь (виток) начинает вращаться. Так как проводники якоря (витка) вращаются в магнитном поле, то в них также будет индуктироваться ЭДС. Направление этой ЭДС в двигателе такое же, как и в генераторе. Следовательно, в двигателе ЭДС якоря направлена против тока I_a. Поэтому ЭДС якоря двигателя называется также *противо-ЭДС*.

Направление электромагнитной силы определяется по правилу «левой руки», а именно: ладонь левой руки располагают в магнитном поле так, чтобы линии поля были направлены в ладонь, а четыре пальца руки, вытянутые в плоскости ладони, располагаются в направлении тока; тогда большой палец, отогнутый в плоскости ладони на 90°, покажет направление электромагнитной силы $F_{пр}$ (рис. 2.5, *б*).

2.3. Основные элементы электрической машины постоянного тока

Как указывалось выше, машина постоянного тока состоит из двух основных частей: неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора, который является якорем. Неподвижная и вращающаяся части отделены друг от друга воздушным зазором (рис. 2.6).

Статор состоит из станины *6*, главных полюсов *4* с обмотками возбуждения *5*, переднего и заднего подшипниковых щитов *13*, *7*, щеткодержателей *15* со щетками *2*. Станина опирается на фундамент посредством лап *12*.

Якорь состоит из вала *10*, сердечника якоря *3* с обмоткой *9*, лобовые части которой покрыты бандажами *11*, и коллектора *1*. Сердечник якоря выполнен из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, изолированных друг от друга лаком.

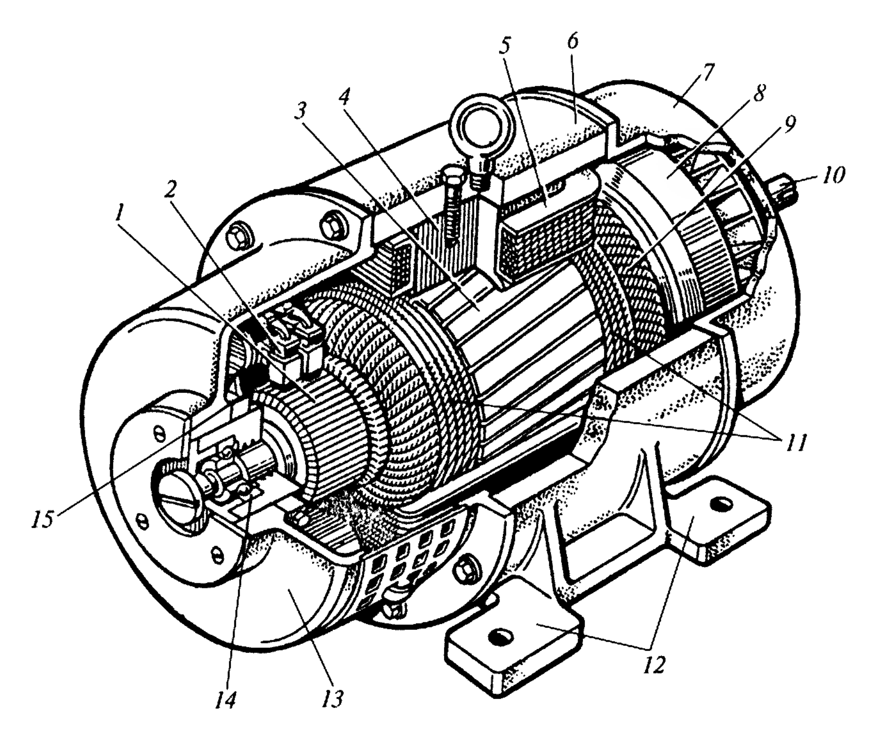


Рис. 2.6. Электрическая машина постоянного тока:
1 — коллектор; *2* — щетки; *3* — сердечник якоря; *4* — главный полюс; *5* — обмотка возбуждения главного полюса; *6* — станина; *7*, *13* — задний и передний подшипниковые щиты; *8* — вентилятор; *9* — обмотка якоря; *10* — вал; *11* — бандаж; *12* — опорные лапы; *14* — подшипник; *15* — щеткодержатель

Сердечник якоря выполняют из отдельных листов электротехнической стали, выполненных в виде дисков (рис. 2.7, *а*). Диски насаживают вал либо непосредственно, либо набирают на якорную втулку, которую напрессовывают на вал. Сердечник якоря большого диаметра составляют из штампованных сегментов (рис. 2.7, *б*).

В пазы якоря укладывают обмотку. Ее обычно выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами закрывают клиньями, выполненными из дерева или из текстолита. Лобовые части обмотки якоря крепят бандажом *11* (см. рис. 2.6). Бандаж может быть проволочным (некоторые вспомогательные машины), но в тяговых машинах его чаще всего выполняют из стеклоленты.

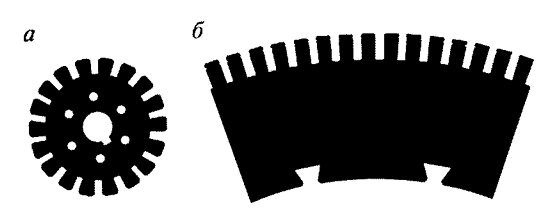


Рис. 2.7. Диск (*а*) и сегмент (*б*) стали якоря

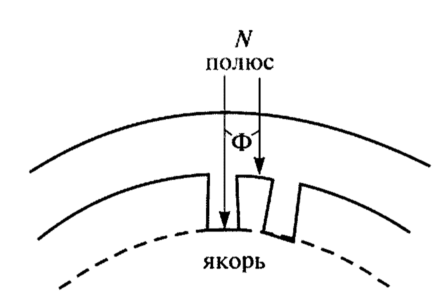


Рис. 2.8. Изменения длины магнитной силовой линии в пазу якоря

Обмотку якоря присоединяют к коллектору *1* (см. рис. 2.6), который в зависимости от мощности, быстроходности и других факторов имеет различное исполнение.

Может возникнуть вопрос: почему же в машине постоянного тока якорь и главные полюсы делают шихтованными? Ведь из курса электротехники известно, что вихревые токи возникают лишь в случае, если магнитный поток будет либо переменным, либо пульсирующим. Рассмотрим участок электрической машины, включающий воздушный зазор и части главного полюса и якоря (рис. 2.8). При вращении якоря магнитная силовая линия попадает то в его паз, то в зубец. Из курса электротехники известно, что магнитная проницаемость воздуха примерно в 1000 раз меньше магнитной проницаемости стали. Поэтому происходит изменение магнитного сопротивления, а это приводит к пульсации магнитного потока, что вызовет появление вихревых токов. Вихревые токи нагревают машину, что вредно влияет на состояние изоляции, и снижают ее КПД. Вследствие этого сердечники якоря и главных полюсов делают шихтованными, т.е. из отдельных пластин электротехнической стали.

Станина с главными полюсами образуют магнитную систему машины, которую называют *индуктором.* Станину изготовляют из ферромагнитного материала — обычно стали — материала, обладающего прочностью и магнитной проницаемостью. В машинах малой и средней мощности ее изготавливают из стальной трубы,

а в машинах большой мощности применяют стальное литье, например, в тяговых электродвигателях локомотивов. Также используют сварные станины из толстолистовой стали (тяговый генератор тепловоза).

Главные полюса с обмотками возбуждения предназначены для создания основного магнитного потока. Они состоят из сердечника *1* (рис. 2.9), изготовленного из отдельных листов электротехнической стали, скрепленных заклепками или шпильками, и катушки возбуждения *2*. Сердечник прикреплен к станине *3* болтом *4*.

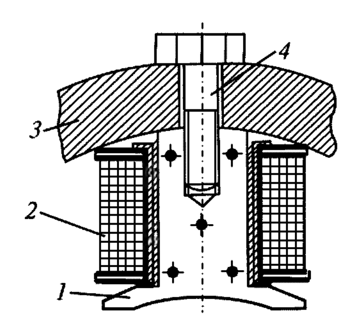


Рис. 2.9. Главный полюс: *1* — сердечник главного полюса; *2* — обмотка возбуждения; *3* — станина; *4* — болт

Изменяя ток, протекающий по обмотке возбуждения, можно регулировать величину основного магнитного потока.

В машинах мощностью более 0,5 кВт между главными полюсами устанавливают добавочные полюса, улучшающие условия токосъема. Добавочные полюса, как и главные, крепят к станине болтами.

Устройство коллектора показано на рис. 2.10. Пластины *1* коллектора изготовляют из твердотянутой меди толщиной 3—15 мм, друг от друга их изолируют миканитовыми прокладками. Нижняя часть коллекторных пластин имеет форму «ласточкин хвост». Стальные конусы *11*, *7* с клиновидными выступами через миканитовые манжеты *2* зажимают нижнюю часть коллекторных пластин посредством гайки *10*. Коллектор смонтирован на втулке *8*, кото-

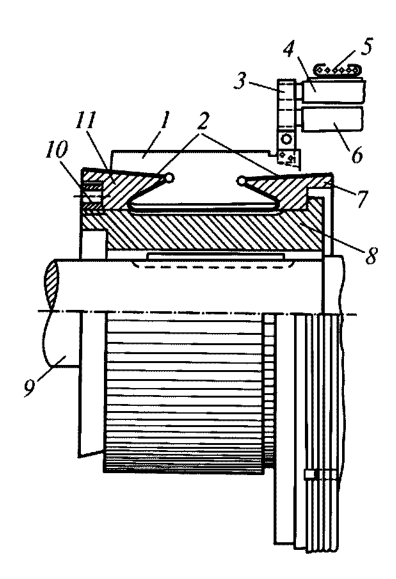


Рис. 2.10. Устройство коллектора: *1* — коллекторная пластина; *2* — миканитовая манжета; *3* — «петушок» коллектора; *4*, *6* — выводы секций обмотки якоря; *5* — бандаж; *7*, *11* — стальные клинья; *8* — втулка; *9* — вал; *10* — гайка

рая напрессована на вал *9*. К выступающей части *3* коллектора, называемой «петушком», припаяны выводы *4* и *6* обмотки якоря, лобовые части которых закреплены бандажом *5*. Коллекторы некоторых электрических машин снабжены неразборным коллектором, основание которого изготовлено из пластмассы (рис. 2.11). Коллекторные пластины *1* при сборке вдавливают в разогретую пластмассу, при застывании которой создается монолитное соединение пластин с пластмассовым основанием *2*.

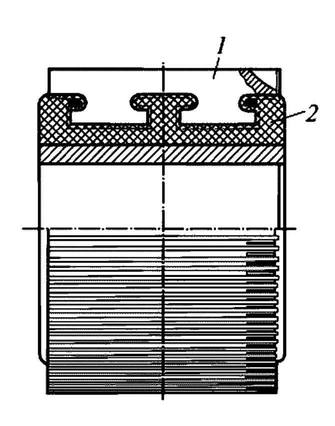


Рис. 2.11. Коллектор с пластмассовым основанием

Для токосъема применяют щеточные аппараты — ***щеткодержатели*** (рис. 2.12). Их укрепляют на щеточных «пальцах» посредством зажимов *4*, при этом на одном «пальце» может быть несколько щеткодержателей. Щетку *1* помещают в обойму *2*. На щетку давит нажимная планка *6* посредством пружины *3*, которая может быть цилиндрической или спиральной. Щетка снабжена медным шунтом *5*. Если бы шунт отсутствовал, то подвод тока осуществлялся бы через пружину, что вызывало бы ее нагрев и потерю ее упругих свойств. Давление на щетку можно регулировать специальным винтом. Щеткодержатели крепят или к корпусу машины или к специальной траверсе, которую можно поворачивать, что очень удобно для осмотра и замены изношенных щеток.

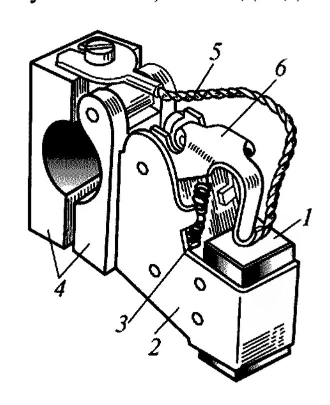


Рис. 2.12. Щеткодержатель: *1* — щетка; *2* — корпус (обойма) щеткодержателя; *3* — пружина; *4* — зажимы; *5* — медный шунт; *6* — нажимная планка

Вентилятор *8* (см. рис. 2.6) предназначен для охлаждения машины; его напрессовывают на вал якоря.

С торцов машина закрыта ***подшипниковыми щитами***: передним *13* (см. рис. 2.6) и с противоположной стороны — задним *7*. На переднем подшипниковом щите с обеих сторон находятся крышки (на рис. 2.6

изображена ее нижняя часть), предназначенные для осмотра и ремонта коллекторно-щеточного узла.

Обмотка якоря. Основным элементом обмотки является *секция*. Секция может иметь один, два и более витков. На рис. 2.13 изображены одновитковые секции обмотки якоря, причем на рис. 2.13, *а* показана секция простой волновой обмотки; на рис. 2.13, *б* — секция простой петлевой обмотки и на рис. 2.13, *в* — разрезная секция. Секции состоят из следующих элементов: активных сторон *2* и *5*, которые уложены в пазы якоря; лобовых частей *1* и *3*, предназначенные для соединения активных сторон в замкнутую цепь; головки *4*. Концы секции *6* припаивают к «петушкам» коллектора. Разрезная секция соединена скобой *7*.

Ширину секций выбирают таким образом, чтобы стороны секций располагались под полюсами разной полярности. Тогда ЭДС, индуктированная в сторонах секций, будет суммироваться. Это возможно только в том случае, если ширина секции равна полюсному делению.

Полюсным делением τ называют часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p}, \tag{2.6}$$

где D_a — диаметр якоря;
p — число пар полюсов.

Обмотки якоря обычно выполняют двухслойными. Одну сторону секции располагают в верхней части паза, а другую — в

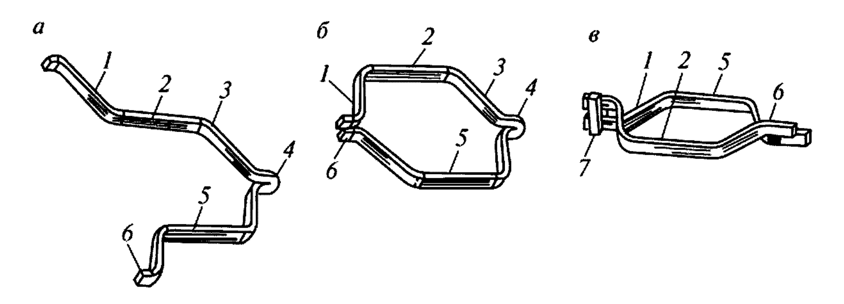


Рис. 2.13. Секции обмотки якоря:
1, *3* — лобовые части секции; *2*, *5* — активные стороны секции; *4* — головка; *6* — концы секции, которые припаивают к «петушкам» коллектора; *7* — скоба

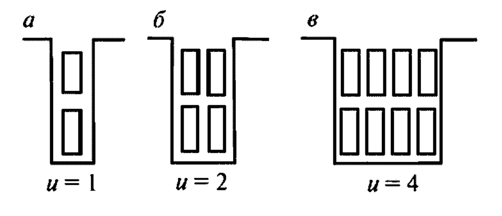


Рис. 2.14. Пазы якоря:
а — в одном реальном пазу расположен один элементарный паз ($u = 1$); *б* — то же, два элементарных паза ($u = 2$); *в* — то же, четыре элементарных паза ($u = 4$)

нижней. Благодаря этому индуктивность всех секций будет одинаковой. Верхняя пазовая сторона одной секции и нижняя пазовая сторона другой секции, лежащие в одном пазу, образуют *элементарный паз*. В одном реальном пазу может быть несколько элементарных пазов $u_п$ (рис. 2.14, *а, б, в*). На схемах обмоток стороны секций, находящиеся в верхнем слое, изображают сплошными линиями, а стороны, расположенные в нижнем слое, — штриховыми. Общее число коллекторных пластин K равно числу секций S и числу элементарных пазов $Z_э$

$$K = S = Z_э. \tag{2.7}$$

Обмотки якорей могут быть следующих видов: простая петлевая, простая волновая, сложная петлевая, сложная волновая и комбинированная.

Простую петлевую обмотку применяют в тяговых машинах при токах свыше 300—350 А. Каждая секция такой обмотки присоединена к двум рядом расположенным коллекторным пластинам. На рис. 2.15 представлены варианты укладки секций простой петле-

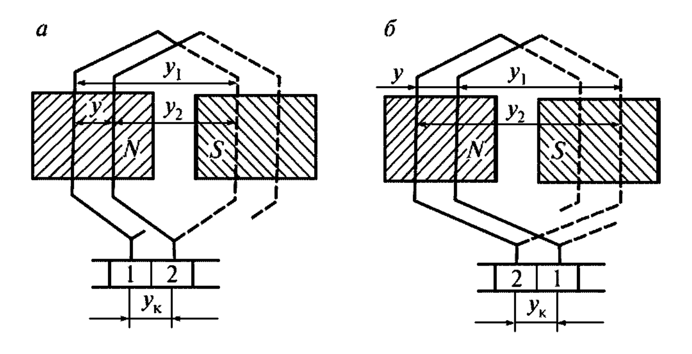


Рис. 2.15. Шаги обмотки якоря:
а — правоходовая; *б* — левоходовая

вой обмотки: если укладка секций ведется слева направо по якорю, то обмотка называется правоходовой (рис. 2.15, *а*), если же укладка секций ведется справа налево, то обмотка называется левоходовой (рис. 2.15, *б*).

Обмотка характеризуется определенными параметрами:

– первый частичный шаг y_1 — расстояние между начальной и конечной сторонами одной секции;

– второй частичный шаг y_2 — расстояние между конечной стороной первой секции и начальной стороной второй секции;

– результирующий шаг y — расстояние между начальными сторонами двух секций;

Шаг по коллектору $y_к$ — расстояние между соседними коллекторными пластинами, к которым присоединены стороны одной секции.

Для простой петлевой обмотки их рассчитывают по формулам:

$$y_1 = \frac{Z_э}{2p} \pm \varepsilon; \qquad (2.8)$$

$$y = 1; \qquad (2.9)$$

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - 1, \qquad (2.10)$$

где ε — некоторая величина, меньшая единицы, вычитая или суммируя которую получают значения шага y_1, равное целому числу.

Шаги по якорю выражают в элементарных пазах.

Пример построения развернутой схемы простой петлевой обмотки со следующими исходными данными: $2p = 4$; $S = K = 16$.

Первый частичный шаг обмотки $y_1 = S/2 \pm \varepsilon = 16/4 - 0 = 4$.

Результирующий шаг и шаг по коллектору $y = y_к = 1$.

Второй частичный шаг $y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$.

Для облегчения вычерчивания схемы удобно обозначать одинаковыми цифрами секционные стороны и коллекторные пластины, с которыми они соединены.

Так как в каждом пазу якоря расположены по две стороны секций, то вычерчиваем 16 двойных сторон секций (рис. 2.16). Сторону секции, расположенную в нижнем слое, обозначаем штриховой линией, а в верхнем слое — сплошной. Затем соединяем секционные стороны в соответствии с первым шагом. Таким образом, необходимо соединить верхнюю сторону 1 секций с нижней

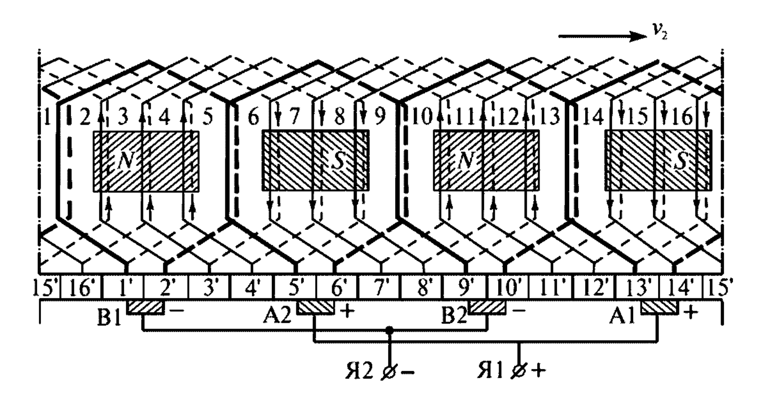


Рис. 2.16. Схема простой петлевой обмотки

стороной, расположенной на расстоянии четырех промежутков от стороны 1, т.е. с нижней стороной 5. Начало первой секции (сторона 1) соединяют с коллекторной пластиной 1′, а конец первой секции (нижнюю сторону 5) — с коллекторной пластиной 2′, с которой соединяют также начало 2 второй секции. Вторая секция образована сторонами 2 и 6, и конец ее присоединяют к пластине 3′ и т.д.

Соединение секций с коллектором обычно выполняют симметричным, т.е. коллекторные пластины, с которыми соединяется начало и конец секции, располагают вблизи оси секции.

Направление наводимой ЭДС в проводниках при вращении якоря определяют по правилу правой руки.

При обходе обмотки по схеме можно установить, что для рассматриваемого положения якоря коллекторные пластины 1, 5, 9, 13 являются узловыми точками, с которыми соединяются секции, имеющие встречное направление ЭДС. Эти коллекторные пластины делят всю обмотку на участки с одинаковым направлением ЭДС в секциях. На эти пластины и устанавливают щетки. Щетки В1 и В2 являются отрицательными, а А1 и А2 — положительными. Действительно, из электротехники известно, что за положительное направление принято направление от «плюса» к «минусу». Но это во внешней сети. А в генераторе ток будет протекать от «минуса» к «плюсу» (рис. 2.17). Щетки одинаковой полярности соединяют между собой параллельно и делают выводы на соответствующие зажимы машины с обозначениями Я1 и Я2.

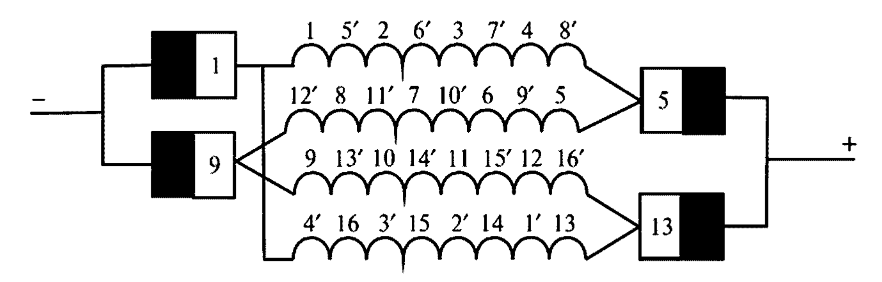


Рис. 2.17. Параллельные ветви простой петлевой обмотки

Щетки делят обмотку якоря на параллельные ветви. От каждой щетки отходят в противоположные стороны две параллельные ветви обмотки и заканчиваются на соседних щетках. Секции параллельных ветвей размещаются под парой расположенных рядом полюсов, и так как обмотка двухслойная, то на каждую пару полюсов приходится две параллельные ветви. Таким образом, общее количество параллельных ветвей $2a$ простой петлевой обмотки равно числу полюсов $2p$.

$$2a = 2p. \qquad (2.11)$$

Простая волновая обмотка состоит из секций, отличающихся по форме от секций простой петлевой обмотки (рис. 2.18). Последовательно обходя секции, совершаем волнообразный обход по якорю и заканчиваем его на коллекторной пластине, находящейся слева или справа от исходной. В первом случае получаем неперекрещенную обмотку (рис. 2.18, *а*), а во втором случае — перекрещенную (рис. 2.18, *б*). Для перекрещенной обмотки требуется большой расход обмоточного провода. За один обход по якорю последовательно укладывается p секций с результирующим шагом y. Затем делают второй, третий и все последующие обходы, пока не будут соединены между собой все секции обмотки.

Первый частичный шаг определяют по формуле

$$y_1 = \frac{S}{2p} - \varepsilon.$$

Результирующий шаг — по формуле

$$y = y_к = \frac{K \pm 1}{p}. \qquad (2.12)$$

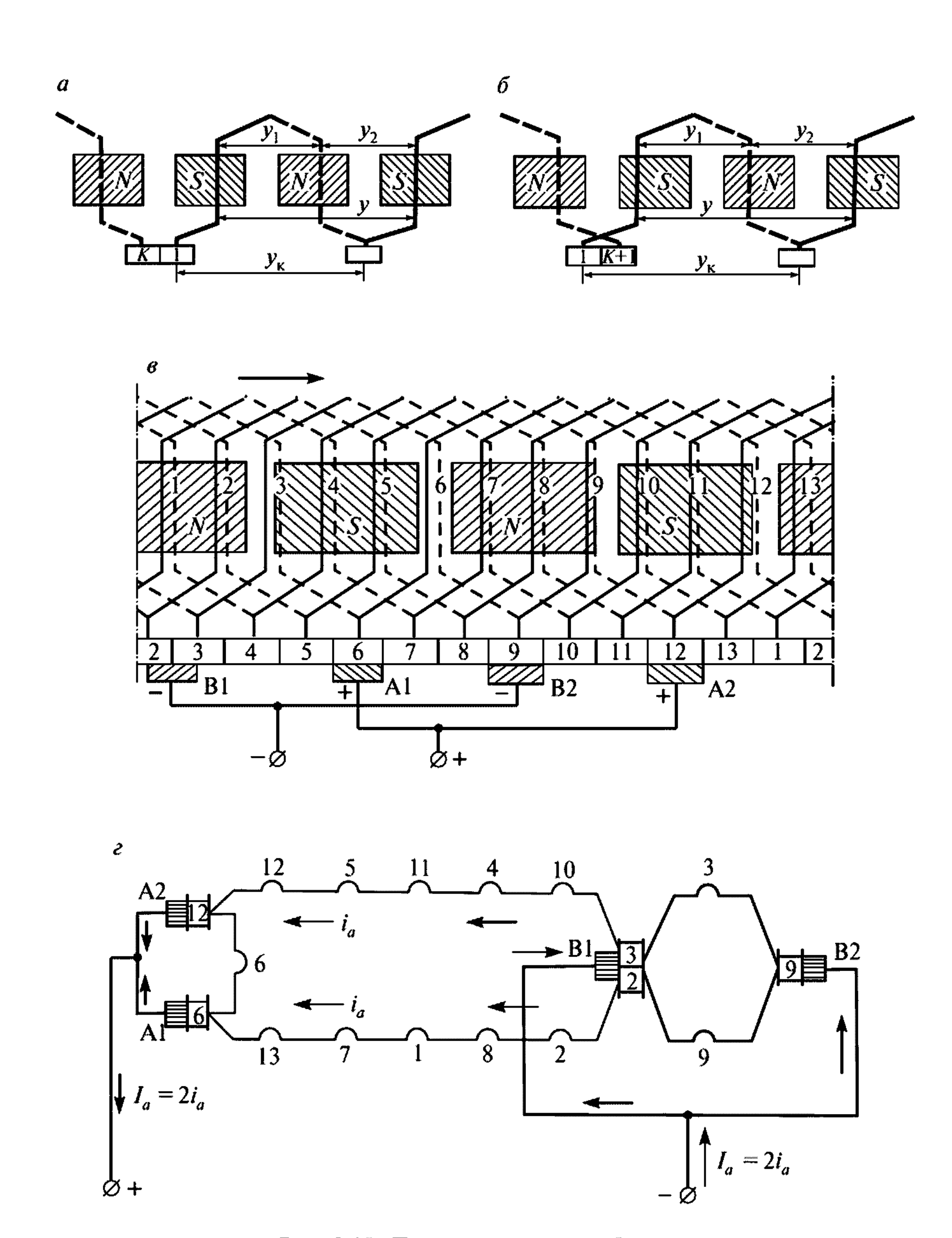


Рис. 2.18. Простая волновая обмотка:
а — секции неперекрещенной простой волновой обмотки; *б* — секции перекрещенной простой волновой обмотки; *в* — развернутая схема простой волновой обмотки; *г* — параллельные ветви простой волновой обмотки

Второй частичный шаг определяют по формуле

$$y_2 = y - y_1. \quad (2.13)$$

Знак «минус» относится к левоходовой обмотке, знак «плюс» — к правоходовой.

Так как K не может быть дробным числом, то и $y_к = y$ также должен быть целым числом.

Пример построения простой волновой обмотки по данным: $K = S = Z_э = 17$; $2p = 4$.

Определим первый частичный шаг $y_1 = 17/4 = 4{,}25$, $\varepsilon = 0{,}25$.

Результирующий шаг и шаг по коллектору $y = y_к = (17 - 1)/2 = 8$.

Второй частичный шаг $y_2 = 8 - 4 = 4$.

Схему обмотки выполняют следующим образом. Верхнюю сторону 1 соединяют с нижней стороной 5, расположенной на расстоянии четырех промежутков от стороны 1 в соответствии с первым шагом $y_1 = 4$. Начало первой секции соединяют с коллекторной пластиной 1′ и конец первой секции соединяют с коллекторной пластиной 9′ и с началом секции также 9, следующие за первой секцией по схеме обмотки в соответствии с шагом (нижнюю сторону 13) соединяют с коллекторной пластиной 17′ и далее начинают второй обход.

Развернутая схема простой волновой обмотки по приведенным выше расчетным данным приведена на рис. 2.18, *в*.

На рис. 2.18, *г* показана схема параллельных ветвей простой волновой обмотки. Число параллельных ветвей равно

$$2a = 2 \quad (2.14)$$

независимо от числа полюсов.

К сложным видам обмоток относят сложную петлевую, сложную волновую и комбинированные обмотки.

Сложная петлевая обмотка состоит из двух и более простых петлевых обмоток, уложенных в пазы якоря. Иногда такую обмотку называют сложной параллельной. В этой обмотке секции и коллекторные пластины m простых обмоток по окружности якоря чередуются, поэтому для отвода тока из обмоток необходимо, чтобы ширина щеток была не меньше m коллекторных делений. Таким образом, m простых обмоток включаются с помощью щеток и количество параллельных ветвей сложной петлевой обмотки равно $2a = 2pm$. Результирующий шаг по элементарным пазам и шаг

по коллектору сложной петлевой обмотки равен $y = y_к = m$. Шаги y_1 и y_2 определяют так же, как и для простой петлевой обмотки. Возможность получения в сложных обмотках большого числа витков без увеличения числа полюсов составляет отличительную особенность этих обмоток.

Сложная петлевая обмотка применяется в тяговом генераторе постоянного тока типа ГП-311Б тепловозов 2ТЭ10М, 2ТЭ10У, 2ТЭ10В и др.

Сложная волновая обмотка, как и сложная петлевая, также состоит из двух и более простых волновых обмоток. Число параллельных ветвей сложной волновой обмотки равно $2a = 2m$ (обычно $2a = 4$), где m — число простых обмоток в сложной (чаще всего $m = 2$).

Комбинированная обмотка состоит из простой петлевой и простой волновой обмоток, уложенных в пазы якоря и присоединенных к общему коллектору. Так как обмотка расположена в четыре слоя, то к каждой пластине коллектора присоединяют по четыре проводника.

Комбинированную обмотку применяли в первых выпусках тягового генератора ГП-311Б.

Условия симметрии обмоток. Обмотка якоря будет симметричной, если ЭДС ее параллельных ветвей при любом положении якоря будут равны и если параллельные ветви обладают одинаковым сопротивлением; в противном случае по обмотке якоря появится ток при холостом ходе. Уравнительный ток нагревает обмотку якоря и увеличивает плотность тока под щетками, вызывая повышенное искрение при токосъеме. Для устранения возможности появления уравнительных токов необходимо соблюдать определенные условия симметрии обмотки якоря, и состоят они в следующем:

– число проводников во всех пазах должно быть одинаковым, т.е. $S = N/Z$ — целое число;

– каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число пазов Z/a — целое число;

– каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число секций, т.е. S/a — целое число;

– каждой стороне секций, принадлежащей одной паре параллельных ветвей, должны соответствовать секционные стороны других пар параллельных ветвей иначе говоря, каждая пара параллель-

ных ветвей обмотки должна занимать одинаковое положение относительно системы главных полюсов, $2p/a$ — целое число.

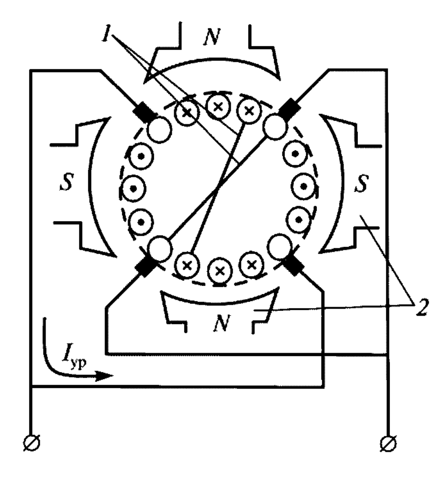


Рис. 2.19. Уравнительные соединения 1-го рода

Уравнительные соединения. При соблюдении условий симметрии обмоток якоря ЭДС в параллельной ветви должны быть одинаковы. Однако нарушение магнитной симметрии машины вследствие различия проводимости для путей магнитного потока приводит к неравенству ЭДС и наличию уравнительного тока.

На рис. 2.19 показана схема машины постоянного тока с четырьмя полюсами *2*. Здесь для упрощения коллектор не изображен, щетки установлены на проводники, выводы которых подключены к коллекторным пластинам, где установлены щетки.

Уравнительный ток, протекая через щеточный аппарат, перегружает щетки, вызывая повышенное искрение. Для устранения этого нежелательного явления создают дополнительные пути *1* для уравнительных токов, минуя коллекторно-щеточный узел. Для этого соединяют точки одинакового потенциала обмотки якоря проводниками малого сопротивления. К этим точкам относятся концы секций, присоединяемые к коллекторным пластинам, или лобовые части обмотки со стороны противоположной коллектору. Число точек равного потенциала, которое можно найти в симметричной обмотке, $a = p$. Такие соединения называют *уравнительными соединениями первого рода,* или *уравнителями первого рода* или просто *уравнителями.* Уравнители выполняют либо на стороне коллектора (тяговые электродвигатели НБ-418К6, ТЛ2К и др.), либо на противоположной от коллектора стороне. Шаг уравнителей $y_{ур}$ равен потенциальному шагу обмотки $y_{п}$:

$$y_{ур} = \frac{K}{p}. \qquad (2.15)$$

Электродвижущая сила генератора. Формулу (2.1) путем несложных математических действий можно преобразовать в формулу ЭДС E_a генератора постоянного тока

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n, \text{ В}, \quad (2.16)$$

или

$$E_a = C_e \Phi n, \quad (2.17)$$

где $C_e = pN/60a$ — конструктивная постоянная ЭДС машины;
p — число пар полюсов;
a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;
N — число активных проводников обмотки якоря;
Φ — магнитный поток, Вб;
n — частота вращения якоря, об/мин.

Как следует из выражений (2.16) и (2.17), ЭДС E_a пропорциональна основному магнитному потоку и частоте вращения якоря.

Напряжение U_a на зажимах генератора меньше ЭДС E_a на значение падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря r_a

$$U_a = E_a - I_a r_a. \quad (2.18)$$

Электромагнитный момент. При нагрузке машины по проводникам якоря протекает ток. При взаимодействии этого тока с магнитным полем полюсов возникает сила f, величину которой определяют по формуле

$$f = Bli, \text{ Н}, \quad (2.19)$$

где B — магнитная индукция, Тл;
l — активная длина проводника секции якоря, м;
i — ток, протекающий по секции якоря, А.

Также путем несложных математических преобразований из формулы (2.18) можно получить формулу электромагнитного момента M

$$M = \frac{pN}{2a\pi} \Phi I_a, \quad (2.20)$$

$$M = C_\text{м} \Phi I_a, \quad (2.21)$$

где p — число пар полюсов;
N — число активных проводников обмотки якоря;
Φ — магнитный поток, Вб;
a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря;
I_a — ток, протекающий по обмотке якоря, А;
$C_\text{м} = pN/(2a\pi)$ — конструктивная постоянная момента.

В системе СИ значения C_e и $C_м$ одинаковы. Поэтому ЭДС равна

$$E_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi\omega, \text{В}. \quad (2.22)$$

Из соотношений (2.16) и (2.20) вытекают два равноценных выражения для электромагнитной мощности

$$P_{эм} = E_a I_a = M_{эм}\omega = \frac{M_{эм} n}{9{,}55}. \quad (2.23)$$

Противо-ЭДС. При вращении якоря электродвигателя проводники его обмотки пересекают магнитные линии главных полюсов, вследствие этого в них индуктируется ЭДС E_a, определяемая равенствами (2.16) и (2.17). Электродвижущая сила якоря E_a направлена против тока I_a, поэтому ее называют *противо-ЭДС.*

Напряжение, приложенное к якорю электродвигателя, уравновешивается ЭДС E_a и падением напряжения в обмотке якоря

$$U_a = E_a + I_a r_a. \quad (2.24)$$

Сопротивление тяговых двигателей ТПС очень мало (около 0,04 Ом) и, следовательно, напряжение U_a практически уравновешивается противо-ЭДС E_a.

Ток I_a, протекающий по обмотке якоря, равен

$$I_a = \frac{U_a - C_e n\Phi}{r_a}. \quad (2.25)$$

Если в формулу (2.26) подставить значение E_a из (2.17), то получим зависимость, определяющую регулирование частоты вращения якоря электродвигателя

$$n = \frac{U_a - I_a r_a}{C_e \Phi}. \quad (2.26)$$

2.4. Магнитная цепь машины

Магнитный поток. Главные полюсы с обмотками возбуждения создают магнитодвижущую силу (МДС), которая, в свою очередь, создает магнитное поле, линии которого замыкаются через участки машины, образующие ее магнитную систему. Рассмотрим магнитное поле машины при отсутствии нагрузки, т.е. при холостом ходе.

На поперечном разрезе машины (рис. 2.20) показан путь магнитного потока, из которого видно, что весь магнитный поток делится на две неравные части. Бо́льшая часть — основной магнитный поток Ф — пронизывает воздушный зазор и якорь и разветвляется в его сердечнике, далее подходит к соседним полюсам и замыкается через станину. *Основным магнитным потоком* Ф называют поток в воздушном зазоре σ, приходящийся на один полюс.

Меньшая часть — поток рассеяния $Ф_σ$ — замыкается между полюсами, минуя якорь. Тогда магнитный поток полюса

$$Ф_п = Ф + Ф_σ = (1 + Ф/Ф_σ)\ Ф = K\,Ф,$$

где $K = 1 + Ф/Ф_σ$ — коэффициент рассеивания главных полюсов. Для машин постоянного тока $K = 1{,}12$—$1{,}25$.

Магнитная цепь машины состоит из отдельных участков: $h_п$ — длина сердечников полюсов; δ — длина воздушного зазора между полюсом и якорем; $h_{з2}$ — длина зубцового слоя якоря; L_{c2} — длина спинки якоря; L_{c1} — длина участка станины. Каждый из участков обладает разным магнитным сопротивлением, так как устройства отличаются как физическими свойствами, так и размерами. Расчет магнитной цепи электрической машины состоит в определении магнитных напряжений для всех участков, однако порядок расчета магнитной цепи выходит за рамки настоящего учебного

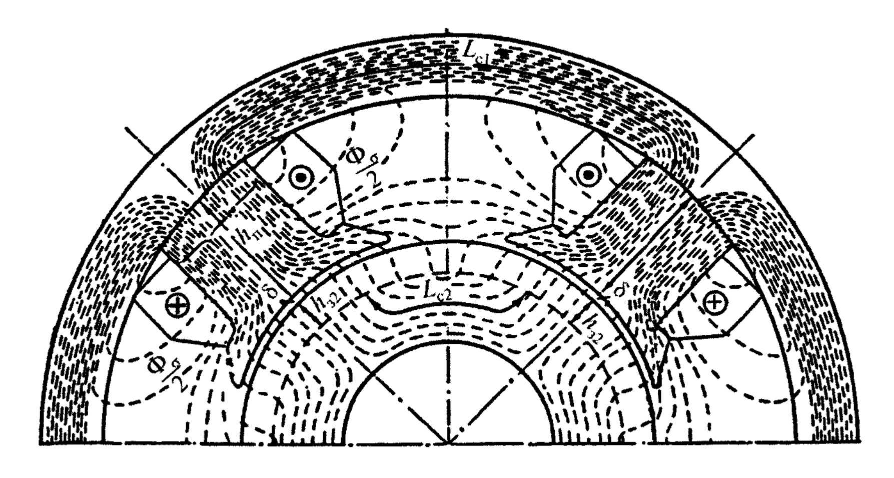


Рис. 2.20. Магнитная цепь машины постоянного тока

пособия. Все участки магнитной цепи изготовляют из ферромагнитных материалов:

– сердечник якоря — из листов тонколистовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм марок 2012, 2014 и 2411;

– сердечник главных полюсов — из листовой анизотропной (холоднокатаной) стали толщиной 1 мм марки 3411;

– станину — обычно из конструкционной стали Ст3, а для тяговых электродвигателей — из стального литья. В некоторых случаях станину выполняют сварной из листовой стали, а в машинах малой мощности — из стальных цельнотянутых труб.

При заданном значении ЭДС машины $E_а$ определяют значение Ф

$$\Phi = \frac{60aE_a}{p} Nn. \tag{2.27}$$

Магнитная характеристика машины имеет вид, показанный на рис. 2.21. В начале характеристики $\Phi = f(F)$ наблюдается линейная зависимость между Ф и F (линия 0–c), а затем наступает магнитное насыщение магнитной цепи машины и линейная зависимость (участок d–a–1) нарушается. Участок между точками d и a называют коленом кривой намагничивания. Если бы не было насыщения, то изменение кривой $\Phi = f(F)$ происходило бы по линии 0–d–c. Величина магнитного потока соответствовала бы МДС F_1, а не $F_{ном}$. Для уменьшения габаритов тяговых электрических машин их магнитную цепь делают насыщенной, т.е. рабочая точка машины располагается между точками d и a.

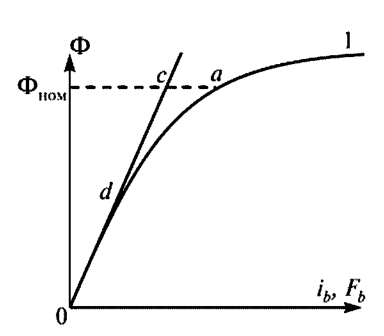


Рис. 2.21. Магнитная характеристика машины

Реакция якоря. При отсутствии тока якоря магнитный поток главных полюсов (рис. 2.22, *a*) симметричен относительно оси главных полюсов, геометрической нейтрали n–n' и равномерно пересекает проводники обмотки якоря, индуктируя в них ЭДС. *Геометрическая нейтраль* — прямая, проходящая через центр окружности якоря и посередине между двумя соседними полюсами. Как

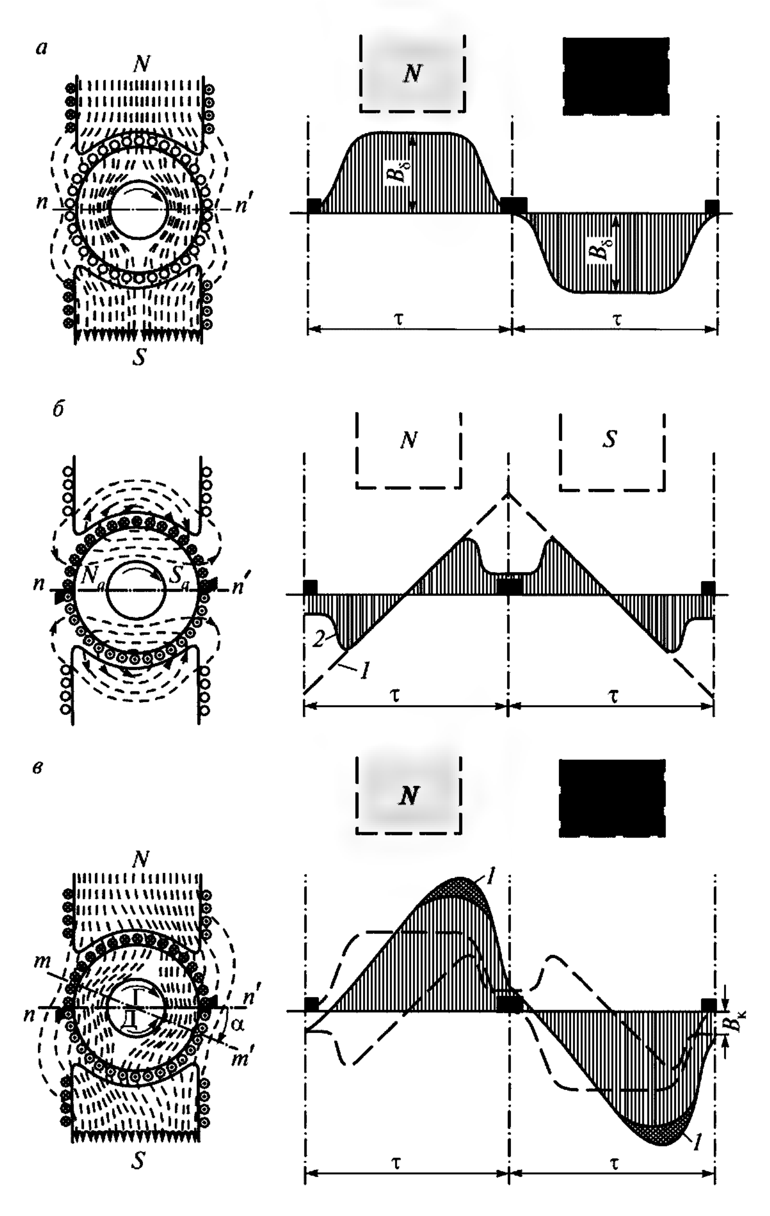


Рис. 2.22. Магнитное поле машины и распределение магнитной индукции в воздушном зазоре:
1 — наибольшее значение МДС на линии щеток

будет указано ниже, щетки в тяговых электродвигателях устанавливают только на геометрической нейтрали. В межполюсном пространстве магнитная индукция снижается до нуля. Распределение магнитной индукции $B_δ$ в воздушном зазоре имеет вид трапецеидальных кривых.

Если ток возбуждения отключить, то магнитный поток главных полюсов будет отсутствовать. Однако номинальный ток обмотки якоря будет создавать свой магнитный поток (рис. 2.22, *б*) с полюсами N_a и S_a, которые повернуты на угол 90° относительно оси главных полюсов, т.е. расположены поперек оси главных полюсов. Наибольшее значение магнитной индукции якоря будет на линии щеток — по геометрической нейтрали, а по оси полюсов магнитная индукция равна нулю. В межполюсном пространстве магнитная индукция резко ослабляется (рис. 2.22, *б*, график *2*). Это объясняется тем, что в межполюсном пространстве увеличивается магнитное сопротивление.

При нагрузке по обмотке якоря и по обмотке возбуждения протекают токи, образующие магнитный поток главных полюсов и магнитный поток якоря (рис. 2.22, *в*). Эти магнитные потоки будут взаимодействовать между собой.

Воздействие магнитного потока якоря на магнитный поток главных полюсов называется ***реакцией якоря***, которая искажает магнитное поле машины, делает его несимметричным относительно оси полюсов. При этом результирующий магнитный поток как бы поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол, а физическая нейтраль *m—m'* (прямая, проходящая через центр окружности якоря и через точки на якоре, где индукция равна нулю) смещается относительно геометрической нейтрали *n—n'* на угол α. Чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажение магнитного поля.

При работе машины в режиме генератора физическая нейтраль смещается по направлению вращения якоря, а при работе в режиме двигателя — против вращения якоря.

Реакция якоря оказывает вредное влияние на работу машины. Во-первых, сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит к более тяжелым условиям работы коллекторно-щеточного узла, вызывая повышенное искрение. Во-вторых, искажение магнитного поля по окружности якоря пропорциональ-

но индуктируемой ЭДС в обмотках якоря, что вызывает увеличение напряжения $U_к$ между соседними коллекторными пластинами, особенно в местах, где большая плотность магнитных силовых линий. Это может привести к круговому огню по коллектору. При значительных нагрузках машины $U_к$ может превзойти допустимые пределы и миканитовая прокладка между смежными пластинами будет перекрыта электрической дугой. Имеющиеся на коллекторе частицы щеточного графита будут способствовать развитию электрической дуги, что приведет к возникновению мощной электрической дуги, перекрывающей весь коллектор или значительную его часть, — явления чрезвычайно опасного.

Как указывалось выше, тяговые машины для уменьшения габаритов выполняют магнитонасыщенными. Реакция якоря в этих машинах уменьшает результирующий магнитный поток, что приводит к уменьшению момента и увеличению частоты вращения тяговых электродвигателей.

Наиболее эффективным средством борьбы с вредным влиянием реакции якоря является применение в машине компенсационной обмотки. Эту обмотку укладывают в пазы полюсных наконечников главных полюсов и включают последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы магнитный поток компенсационной обмотки был направлен встречно магнитному потоку реакции якоря. Таким образом, в машинах с компенсационной обмоткой при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки распределение магнитной индукции в воздушном зазоре практически не изменяется. Но в межполюсном пространстве часть магнитного потока якоря остается некомпенсированной. Это явление устраняют добавочными полюсами.

Причины, вызывающие искрение на коллекторе. При работе электрической машины в щеточном контакте и на коллекторе, может появиться искрение. Сильное искрение вызывает порчу коллектора и сокращает срок службы машины.

Причины, вызывающие искрение на коллекторе, можно разделить на три группы: механические, потенциальные и электромагнитные.

К *механическим причинам* относят: нарушение геометрической формы коллектора (бочкообразность, овальность, конусность и т.д.); вибрации щеткодержателей; выступание над коллектором

миканитовых прокладок; неправильная регулировка нажатия на щетку; чрезмерный износ щеток; неплотное закрепление траверсы, пальцев или щеткодержателей; неправильная регулировка зазора между щеткодержателем и поверхностью коллектора; плохая пришлифовка щеток к коллектору; заедание щеток в щеткодержателях (тугая посадка); обрыв уравнительных соединений; неровности поверхности коллектора и другие причины механического характера.

К потенциальным причинам относят повышение напряжения между соседними коллекторными причинами, превышающее допустимое значение.

Электромагнитные причины обусловлены накоплением в коммутируемых секциях якоря запаса электромагнитной энергии $0{,}5L_c i^2$, которая, разряжаясь через щетки и коллекторные пластины, является причиной коммутации.

Любая из этих причин может вызвать сильное искрение, способное перейти в круговой огонь по коллектору. Искрение может быть вызвано не одной, а несколькими причинами.

Искрение на коллекторе оценивают *степенью* или классом:

– степень 1 — искрение отсутствует;

– степень $1^1/_4$ — слабое точечное искрение под небольшой частью края щетки, не вызывающее почернения коллектора и появления нагара на щетках;

– степень $1^1/_2$ — слабое искрение под большей частью щетки, приводящее к появлению следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием бензином, и следов нагара на щетках;

– степень 2 — искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и при перегрузках. Приводит к появлению следов почернения на коллекторе, не устраняемое протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках;

– степень 3 — значительное искрение под всем краем щетки с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к значительному почернению коллектора, не устраняемое протиранием бензином, а также к подгару и разрушению щеток. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования (изменения направления вращения ротора) машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Продолжительная надежная работа коллекторно-щеточного узла происходит при степени искрения, не превышающем $1^1/_2$.

Ток от щетки к коллектору и обратно передается следующим способом:

– посредством механического контакта между щеткой и коллектором;

– через графитовую токопроводящую пыль, которая образуется от трения щеток о коллектор;

– между коллектором и щеткой образуется ионизированные воздушные щели, являющиеся хорошей токопроводящей зоной.

Если рассмотреть через увеличительные средства (лупу, микроскоп и др.) контактные поверхности щетки и коллектора, то обнаружатся сплошные неровности, через которые проходит ток от щетки к коллектору. Плотность тока в этих неровностях достигает нескольких тысяч ампер на квадратный миллиметр, поэтому эти точки накаляются до красного и белого каления. Однако эти неровности постоянно разрушаются, время существования контакта невелико и ток не успевает нагреть щетки и коллектор.

От действия влаги, которая всегда есть в воздухе, при прохождении тока через слой щеточного контакта возникает явление электролиза, в результате чего на поверхности коллектора образуется блестящая пленка оксидов (так называемая «политура»), имеющая различную окраску (фиолетовую, розовую, коричневую, сине-стальную). «Политура» увеличивает переходное сопротивление щеточного контакта и уменьшает искрение. Поэтому «политура» является признаком хорошей коммутации. Сильное искрение разрушает «политуру» и появляются следы нагара.

Коммутация. Как указывалось выше, обмотка якоря состоит из отдельных секций, витков, которые присоединены к коллекторным пластинам. При вращении якоря коллекторные пластины и секции якоря непрерывно меняют свое положение относительно щеток и полюсов, закрепленных неподвижно.

Процесс изменения направления тока в секции обмотки якоря, связанный с переходом ее из одной параллельной ветви в другую, называется *коммутацией*, а секция — *коммутируемой.*

Время $T_к$, в течение которого секция замкнута накоротко щеткой и коммутируется, называется *периодом коммутации.*

$$T_к = \frac{60}{Kn}\frac{b_щ}{b_к}, \qquad (2.28)$$

где K — число коллекторных пластин;

n — частота вращения якоря, об/мин;

$b_щ$ — ширина щетки;

$b_к$ — расстояние между серединами коллекторных пластин.

Обычно $T_к$ равно 0,001—0,0003 с.

На рис. 2.23 показаны три положения одной и той же коммутируемой секции обмотки (выделена жирными линиями) в процессе вращения якоря. Ширина щетки $b_щ$ принята равной коллекторной пластине, а толщина изоляции между коллекторными пластинами не учитывается.

На рис. 2.23, *а* показано положение секции в начале коммутации. Щетка перекрывает пластину 1, и ток якоря $I_я$, пройдя щетку, распределяется по обеим сторонам коммутируемой секции поровну. Когда якорь вращается, то коллекторные пластины сдвигаются относительно щетки и в какой-то момент щетка равномерно перекрывает обе коллекторные пластины 1 и 2 (рис. 2.23, *б*). Тогда через коммутируемую секцию ток протекать не будет, а в параллельных ветвях он будет равен $I_я/2$.

В конце процесса коммутации (рис. 2.23, *в*) щетка сойдет с коллекторной пластины 1 и перекроет только пластину 2, вследствие че-

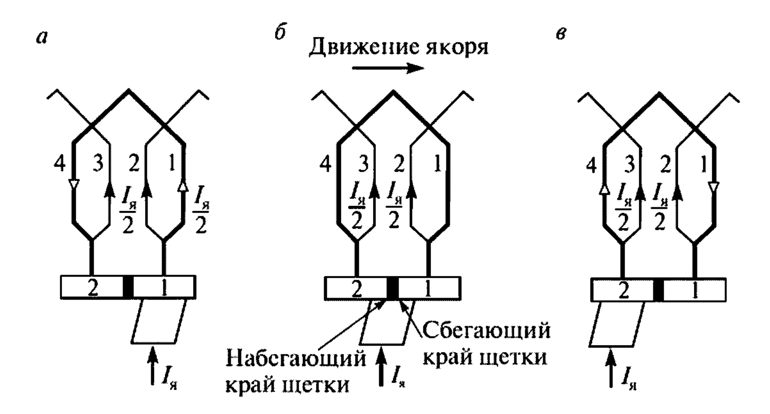


Рис. 2.23. Схема перехода коммутируемой секции из одной параллельной ветви в другую в начале (*а*), середине (*б*) и конце (*в*) перехода

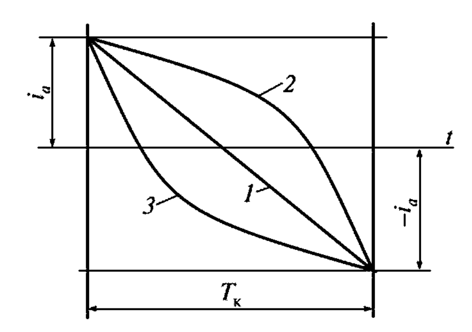


Рис. 2.24. График прямолинейной и криволинейной коммутации:
1 — линия прямолинейной коммутации; *2* — линия замедленной криволинейной коммутации; *3* — линия ускоренной криволинейной коммутации

го ток в коммутируемой секции изменит свое направление по сравнению с первоначальным.

Прямолинейная и криволинейная коммутация. При очень малой частоте вращения $n \to 0$ ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции практически не возникает. Вследствие этого плотность тока под набегающим и сбегающим краями щеток остается неизменной. Из этого следует, что ток в коммутируемой секции будет изменяться по линейному закону (прямая *1*, рис. 2.24).

В современных электрических машинах ТПС период коммутации $T_к$ очень мал и составляет приблизительно 10^{-3}—10^{-5} с. За такой очень и очень малый промежуток времени ток в коммутируемой секции должен изменить свое направление. Поэтому согласно правилу Ленца возникает ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L_с \frac{di}{dt}, \tag{2.29}$$

где $L_с$ — индуктивность секций;
i — ток секции.

Обычно щетка перекрывает не одну, а несколько коллекторных пластин, а в одном пазу якоря находится несколько пазовых сторон, принадлежащих разным секциям, одновременно находящимся в состоянии коммутации. Поэтому изменение магнитного потока каждой из этих частей индуктирует в пазовых сторонах других секций ЭДС взаимоиндукции

$$e_м = -M_с \frac{di}{dt}, \tag{2.30}$$

где $M_с$ — взаимная индуктивность одновременно коммутирующих секций.

ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции направлены в одну сторону, поэтому суммируются и образуют реактивную ЭДС

$$e_p = e_L + e_м = -\left(L_с + M_с\right)\frac{di}{dt}. \qquad (2.31)$$

Кроме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции в коммутируемой секции от действия магнитного поля якоря индуктируется ЭДС e_{aq}, направление которой определяется правилом правой руки. Таким образом, эта ЭДС также стремится сохранить прежнее направление тока и также замедляет процесс коммутации

$$e_{aq} = 2B_{aq} w_с l_\delta v_a, \qquad (2.32)$$

где B_{aq} — индукция поля реакции якоря;
$w_с$ — число витков в секции;
v_a — окружная скорость якоря;
l_δ — длина активной стороны коммутируемой секции якоря.

Все рассмотренные ЭДС e_L, $e_м$, e_{aq} — замедляют процесс коммутации и являются вредными. Коммутация становится криволинейной замедленной (см. рис. 2.24, кривая *2*). При замедленной коммутации изменяется плотность тока под набегающим и сбегающим краями щетки. Под набегающим краем щетки плотность тока уменьшается, а под сбегающим — увеличивается, причем увеличивается до такой величины, что часть тока будет замыкаться по воздуху в виде искр. Искрение на коллекторе вызывает нагревание и порчу его поверхности, нарушение работы щеточного аппарата, вследствие чего снижается надежность машины.

Способы улучшения коммутации. В коммутируемой секции, которая закорочена щеткой, возникает реактивная ЭДС $E_р$, создающая добавочный реактивный ток $I_р$:

$$I_р = \frac{E_р}{\sum R}, \qquad (2.33)$$

где $\sum R = R_с + R_к + R_щ$ — сопротивление контура коммутируемой секции;
$R_с$ — сопротивление секции;
$R_к$ — сопротивление коллектора;
$R_щ$ — сопротивление щеток.

Для улучшения коммутации необходимо уменьшить добавочный реактивный ток $I_р$ до нуля. Для этого или увеличивают $\sum R$, или уменьшают $E_р$, или производят оба действия одновременно.

Увеличение сопротивления $\sum R$. Все три составляющие $\sum R$ увеличивать нельзя. Например, если увеличивать сопротивление сек-

ций или коллектора, то уменьшится КПД машины. Наиболее приемлемым является подбор щеток с надлежащими характеристиками и сохранение «политуры» — оксидной пленки на поверхности на коллекторе.

Для этого в машинах постоянного тока применяют щетки с повышенным значением переходного сопротивления: в машинах с тяжелыми режимами работы — электрографитные и угольно-графитные, в низковольтных машинах — медно- или бронзо-графитные. Электрические свойства щеток характеризует величина, зависящая от их переходного сопротивления — переходным падением напряжения на пару щеток $U_щ$ при номинальной плотности тока (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Электрические свойства щеток

Группа щеток, обозначение	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе, В	Номинальная плотность тока, А/мм^2	Область применения
Графитовые Г, 611М	1,9—2,0	0,11—0,12	Для машин с облегченными условиями коммутации
Электрографитовые, ЭГ	2,0—2,7	0,10—0,15	Для машин со средними и затруднительными условиями коммутации
Угольно-графитовые, УГ; Т	2,0	0,06—0,07	Для машин со средними условиями коммутации
Медно-графитовые, М; МГ	0,2—1,5	0,15—0,20	Для машин низковольтных (до 48 В), контактных колец

Уменьшение реактивной ЭДС $E_р$. ЭДС самоиндукции зависит от индуктивности коммутируемой секции, т.е. от глубины паза якоря. С этой целью целесообразно уменьшить глубину паза или увеличить его ширину.

ЭДС взаимоиндукции зависит от ширины щетки: чем шире щетка, тем большее количество коллекторных пластин она перекрывает и тем большее количество секций вступает в процесс коммутации, вызывая увеличение ЭДС взаимоиндукции. Однако сделать узкие щетки, равные ширине одной коллекторной пластины, невозможно из-за недостаточной механической прочности. Площадь щетки определяется ее плотностью тока, поэтому при узкой щетке необходимо увеличивать длину коллектора, что в ограниченных габаритах электрических машин ТПС сделать очень сложно. Обычно ширина щетки составляет 2—3 коллекторных деления.

Эффективным средством уменьшения магнитной связи между переключаемыми секциями является их укорочение, т.е. выполнение с укороченным шагом ($y < \tau$). В этом случае для достижения предельной индукции в зубцах якоря целесообразно увеличивать ширину паза и уменьшать его глубину.

Добавочные полюсы. Назначение добавочных полюсов — создать в зоне коммутации магнитное поле такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутируемой секции ЭДС компенсировала реактивную ЭДС $e_р$. Полюсный наконечник *1* сердечника выполняют заостренным, чтобы магнитный поток, создан-

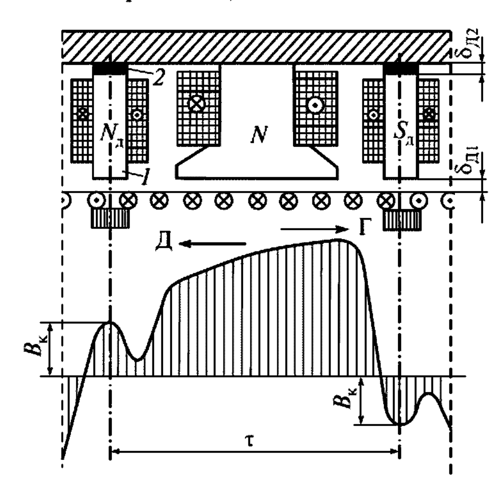


Рис. 2.25. Результирующее магнитное поле в воздушном зазоре машины с добавочными полюсами в генераторном (Г) и двигательном (Д) режимах: *1* — полюсный наконечник дополнительного полюса; *2* — диамагнитная прокладка

ный добавочным полюсом, был направлен только в коммутируемую секцию (рис. 2.25).

Обмотки возбуждения добавочных полюсов всегда включают последовательно с обмоткой якоря для того, чтобы происходило автоматическое усиление действия добавочных полюсов при увеличении внешней нагрузки, вызывающей усиление реакции якоря и реактивной ЭДС в коммутируемой секции. Для предотвращения сползания обмотки возбуждения со стороны наконечника прикреплены латунные угольники.

Добавочные полюсы обеспечивают удовлетворительную коммутацию только в пределах номинальной нагрузки. При перегрузке происходит насыщение магнитной цепи добавочных полюсов. В этом случае реактивная ЭДС $e_р$ изменяется пропорционально току нагрузки, а ЭДС, созданная добавочным полюсом, не будет увеличиваться. Поэтому сердечник добавочного полюса делают ненасыщенным. Для этой цели между сердечником добавочных полюсов и остовом машины делают второй зазор, где устанавливают диамагнитную прокладку *2* из алюминия, гетинакса текстолита и других диамагнитных материалов.

Полярность добавочных полюсов выбирают следующим образом. По направлению вращения якоря генератора полярность добавочного полюса такая же, как у следующего главного полюса, а у двигателя — как у предшествующего.

Число витков обмотки возбуждения добавочных полюсов рассчитывают так, чтобы при номинальной нагрузке происходила компенсация реактивной ЭДС. Если число витков обмотки возбуждения будет больше расчетного, то коммутация будет ускоренной (кривая *3*, см. рис. 2.24). При значительных нагрузках это может привести к искрению под набегающим краем щетки.

2.5. Генераторы постоянного тока

Условные обозначения обмоток машин постоянного тока (рис. 2.26) установлены стандартами РФ. Начало и конец обмоток обозначают следующим образом: якоря Я1 и Я2; независимой обмотки возбуждения Н1 и Н2; параллельной обмотки возбуждения Ш1 и Ш2; последовательной обмотки возбуждения С1 и С2; компенсационной обмотки К1 и К2; обмотки возбуждения добавочных полюсов Д1 и Д2.

По *способу возбуждения* генераторы постоянного тока разделяют на две группы: генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением. Генераторы с независимым возбуждением, в свою очередь, подразделяются на генераторы с электромагнитным возбуждением и генераторы с магнитоэлектрическим возбуждением. Генераторы с самовозбуждением делят на генераторы с параллельным, с последовательным и со смешанным возбуждением.

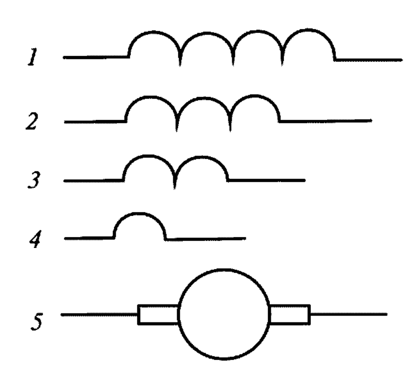


Рис. 2.26. Обозначения обмоток машины постоянного тока:
1 — обмотка возбуждения главных полюсов, включенная независимо от обмотки якоря (выводы обозначаются Н1—Н2), или включенная параллельно обмотке якоря (выводы Ш1—Ш2); *2* — обмотка возбуждения главных полюсов, включенная последовательно с обмоткой якоря (выводы С1—С2); *3* — компенсационная обмотка (выводы К1—К2); *4* — обмотка возбуждения добавочных полюсов (выводы Д1—Д2); *5* — обмотка якоря (выводы Я1—Я2 или Я—ЯЯ)

Генераторы с независимым возбуждением применяют в ТПС довольно широко. Это — тяговые генераторы тепловозов, а также тяговые электродвигатели локомотивов и электропоездов в режиме электрического торможения. При электрическом торможении тяговые электродвигатели последовательного возбуждения переводят в режим генератора независимого возбуждения — создается тормозной электромагнитный момент, который реализуется в тормозную силу поезда.

Схема для снятия характеристик генератора независимого возбуждения приведена на рис. 2.27.

При снятии *характеристики холостого хода* рубильник должен быть разомкнут, а приводной двигатель должен привести генератор Г во вращение до номинального значения. Изменяем сопротивление регулировочного реостата $R_{рг}$, например, уменьшаем. Это приводит к увеличению тока возбуждения $I_в$ и созданного им магнитного потока полюсов Ф. Изменение магнитного потока Ф вызовет изменение ЭДС $E = C_e Ф\, n$. При достижении магнитного насыщения магнитный поток машины Ф и ЭДС E при увеличении $I_в$ не увеличиваются.

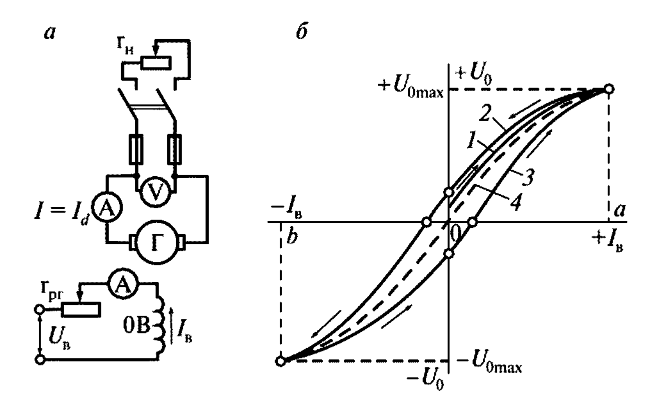


Рис. 2.27. Схема генератора с независимым возбуждением (*а*); характеристика холостого хода (*б*)

При ЭДС, равной $1{,}15U_н$, уменьшают ток возбуждения до нулевого значения. Полученная таким образом кривая *1* проходит в первой четверти до пересечения с осью ординат. При изменении направления тока возбуждения и постепенного увеличения его значения от 0 до минус $I_в$ = 0,6, получаем кривую *2*, которая совместно с кривой *1* и *3* образует гистерезисную петлю, определяющую свойства стали полюсов и ярма. Проведя между линиями *1* и *3* среднюю линию *4*, получаем так называемую расчетную характеристику холостого хода.

Вначале характеристика холостого хода представляет собой прямую линию. Это объясняется тем, что при малых токах возбуждения почти вся МДС идет на преодоление магнитным потоком воздушного зазора — среды с постоянной магнитной проницаемостью. В дальнейшем, по мере увеличения тока возбуждения $I_в$ и соответственно магнитного потока Ф, сталь машины начинает насыщаться, поэтому получаем сначала средненасыщенную часть характеристики холостого хода, так называемое *колено кривой,* а затем сильнонасыщенную часть. Точка *K,* соответствующая номинальному напряжению $U_н$, обычно у тяговых электрических машинах лежит на колене кривой намагничивания.

Это делают по следующим причинам — во-первых, расходуется меньше стали, а в тяговые машины при ограниченных габаритах необходимо вписать как можно бо́льшую мощность. Во-вто-

рых, при работе машины на прямолинейной части кривой напряжение генератора неустойчиво. В-третьих, при работе машины на насыщенной части кривой ограничивается возможность регулирования напряжения.

Таким образом, по характеристике холостого хода можно судить о насыщении магнитной цепи генератора при номинальном режиме работы.

Для снятия *нагрузочной характеристики* приводят во вращение приводной двигатель и замыкают рубильник QS. Затем, поддерживая неизменными частоту вращения и ток якоря, изменяют ток возбуждения, так же как и при снятии характеристики холостого хода, но снимают ее в первой четверти (кривая *2* на рис. 2.28). Нагрузочная характеристика по виду схожа с характеристикой холостого хода, но проходит несколько ниже этой характеристики вследствие падения напряжения в обмотке якоря и размагничивающего действия реакции якоря.

Нагрузочная характеристика и характеристика холостого хода, построенные в одних осях координат, позволяют построить так называемый характеристический треугольник. Посредством треугольника можно оценить влияние падения напряжения и реакции якоря на напряжение генератора, а также он может быть использован для построения внешней и регулировочной характеристик генератора.

Чтобы построить характеристический треугольник, из точки C на нагрузочной характеристике (см. рис. 2.28), соответствующей номинальному напряжению $U_н$, проводим вертикальную прямую до пересечения с характеристикой холостого хода — получим точку K. На отрезке CK откладываем точку B, причем отрезок CB равен падению напряжения I_aR_a. За-

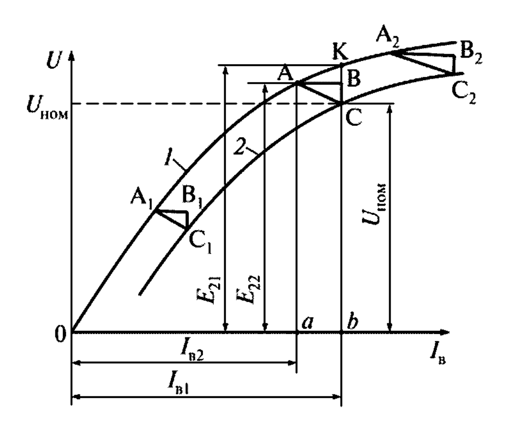


Рис. 2.28. Характеристический треугольник и нагрузочная характеристика:
1 — характеристика холостого хода; *2* — нагрузочная характеристика, ABC — характеристический треугольник

тем из точки В проводим горизонтальную прямую до пересечения в точке А с характеристикой холостого хода, получим горизонтальный катет АВ искомого треугольника АВС. Отрезок ВК соответствует размагничивающему действию реакции якоря.

Из точки А проводим вертикальную прямую до пересечения с осью абсцисс. Отрезок *ab*, равный разности токов $I_{в1}—I_{в2}$, представляет собой ток возбуждения, компенсирующий размагничивающее действие реакции якоря.

Характеристический треугольник можно построить в любой точке нагрузочной характеристики.

Внешняя характеристика (рис. 2.29, *а*) определяет зависимость напряжения генератора от нагрузки, когда ток возбуждения не регулируется.

Для снятия внешней характеристики генератор приводят во вращение до номинальной частоты вращения и нагружают его до номинального тока при номинальном напряжении. Затем уменьшают ток до нуля (холостого хода) и записывают показания приборов.

При переходе к холостому ходу ($I = 0$) напряжение возрастает на вполне определенную величину ΔU, которая называется ***номинальным изменением напряжения генератора***. В генераторах независимого возбуждения

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_н}{U_н} \cdot 100\,\%. \qquad (2.34)$$

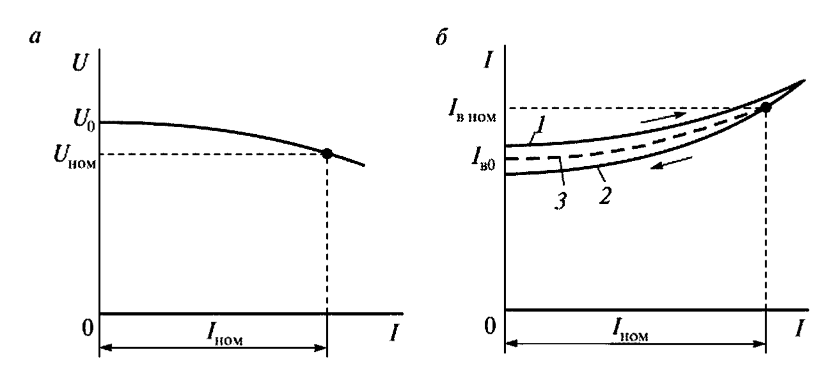


Рис. 2.29. Внешняя (*а*) и регулировочная (*б*) характеристики

Для генераторов независимого возбуждения $\Delta U = 5–10$ %. Причинами изменения напряжения при изменении тока нагрузки являются размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в обмотках якоря.

Регулировочная характеристика (рис. 2.29, *б*) показывает, как нужно регулировать ток возбуждения при изменении тока нагрузки, чтобы напряжение на его зажимах оставалось неизменным.

Для снятия характеристики приводным двигателем приводят генератор во вращение до номинальной частоты вращения. Изменяя ток возбуждения $I_в$, устанавливают номинальное напряжение на зажимах генератора. Затем замыкают рубильник и увеличивают ток нагрузки. Напряжение будет уменьшаться, как это следует из внешней характеристики. Изменяя ток возбуждения, поддерживают постоянное напряжение на зажимах. Увеличивая ток нагрузки I до номинального значения ($I = I_н$), затем уменьшая его до холостого хода $I = 0$ и поддерживая неизменным напряжение, получим две характеристики *1* и *2* (см. рис. 2.29, *б*) — восходящую и нисходящую. Средняя кривая *3*, проведенная между нисходящей и восходящей ветвями, считается практической регулировочной характеристикой.

Генераторы с параллельным возбуждением относятся к генераторам с самовозбуждением. Они не требуют особого источника тока для питания обмотки возбуждения и создают в пределах номинальной нагрузки довольно устойчивое напряжение. На ТПС подобные генераторы применяют в качестве генераторов управления электровозов и электропоездов, вспомогательных генераторов тепловозов и др.

На рис. 2.30, *а* показана схема генератора с самовозбуждением. Из схемы видно, что для того, чтобы при разомкнутом рубильнике по обмотке протекал ток и создавался основной магнитный поток главных полюсов, необходимо напряжение — ЭДС обмотки якоря. Но эта ЭДС будет индуктироваться лишь в том случае, если будет магнитный поток главных полюсов. Получается замкнутый круг — ЭДС будет индуктироваться лишь в том случае, если будет магнитный поток главных полюсов, а магнитный поток появится, если ЭДС создаст ток возбуждения. Поэтому для того чтобы генераторы с самовозбуждением могли нормально работать, не-

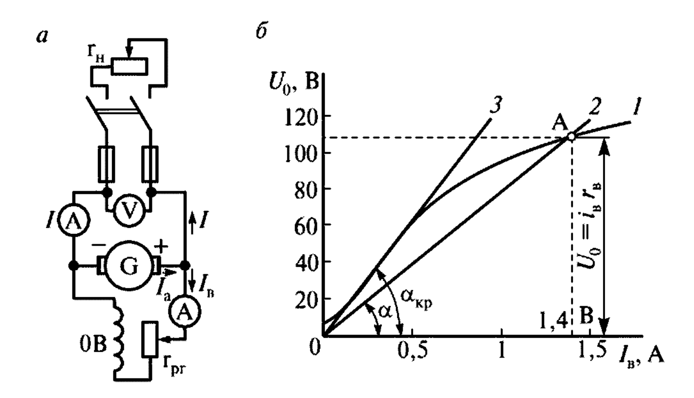


Рис. 2.30. Схема генератора с параллельным возбуждением (*а*) и характеристика холостого хода (*б*)

обходимо соблюдать определенные *условия самовозбуждения*, в том числе:

– наличие остаточного магнитного потока главных полюсов;

– правильное подключение обмотки возбуждения к обмотке якоря;

– сопротивление цепи возбуждения должно быть ниже некоторого критического значения;

– частота вращения якоря должна быть выше критической.

Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы в нем был небольшой (2—3 % от нормального) остаточный магнитный поток. При эксплуатации в работающей машине практически всегда присутствует магнитный поток такого значения $Ф_{ос}$. Вновь изготовленную машину, которая по каким-то причинам размагнитилась, следует намагнитить, пропустив постоянный ток по обмотке возбуждения. На ТПС этим источником тока может быть аккумуляторная батарея.

Процесс самовозбуждения протекает следующим образом. Небольшая ЭДС, индуктированная в обмотке якоря магнитным потоком, создает малый ток $I_в$ в обмотке возбуждения. Ток $I_в$ увеличивает магнитный поток главных полюсов, а следовательно, происходит увеличение ЭДС и т.д. Этот процесс самовозбуждения продолжается до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет установившегося значения.

На рис. 2.30, *б* показана *характеристика холостого хода 1* (выделена жирной линией); линия *2* — зависимость падения напряжения от тока возбуждения $I_в R_в = f(I_в)$ — представляет собой прямую, расположенную под углом α к оси абсцисс, так как $R_в$ = const.

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{V_0}{I_a} = R_в. \qquad (2.35)$$

В этом случае каждому значению $I_в R_в$ соответствует особая прямая, выходящая из начала под углом α.

Точка пересечения А кривой и прямой *2* соответствует окончанию процесса самовозбуждения.

Если увеличить сопротивление $R_в$, т.е. угол α, то точка А будет скользить по характеристике холостого хода в направлении к точке 0 и в конце концов станет касательной к характеристике холостого хода. Это сопротивление называют критическим $R_{кр}$.

Самовозбуждение зависит от частоты вращения генератора. Из формулы $E = C_e \Phi n$ следует, что при $n = 0$, $E = 0$.

Если снять и построить зависимость $E = f(n)$ генератора параллельного возбуждения (рис. 2.31), представляющую собой характеристику самовозбуждения, то из нее следует, что существует значение частоты вращения $n = n_{кр}$, ниже которого самовозбуждение невозможно. Такое значение $n = n_{кр}$ называют *критической частотой вращения*. Процесс самовозбуждения будет начинаться только при $n > n_{кр}$. В этом случае происходит увеличение напряжения. Критическая частота вращения зависит от сопротивления цепи возбуждения и с увеличением последнего возрастает.

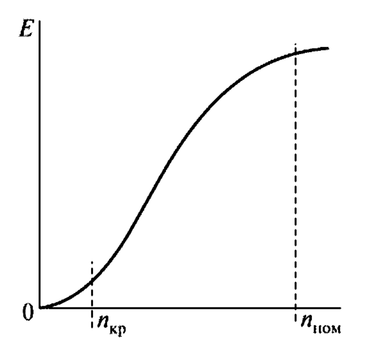


Рис. 2.31. Характеристика самовозбуждения

Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения может быть снята в одной четверти, так как он самовозбуждается лишь в одном направлении.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения более крутая, чем у генератора с независимым возбуждением. Объясняется это тремя причинами. Первые две — те же, что у генератора с независимым возбужде-

нием (размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжение в обмотках якоря). Третья причина — уменьшение тока возбуждения $I_в$ из-за уменьшения величины магнитного потока Ф, вследствие чего индуктированная этим потоком ЭДС уменьшается. Поэтому номинальное изменение напряжения у генератора параллельного возбуждения больше и составляет U = 10—30 %.

Если продолжать увеличение тока нагрузки, то будет происходить уменьшение напряжения. Однако при некотором максимальном значении тока $I = I_{max}$ или $I = I_{кр}$ (точка *а,* рис. 2.32, *а*) характеристика *1* делает петлю и приходит в точку *б* ($I_к$) на оси абсцисс. Это объясняется следующим образом. При уменьшении сопротивления $R_н$ ток I растет, но указанные выше три причины, вызывающие падение напряжения на зажимах генератора, действуют в противоположном направлении. В дальнейшем третья причина становится преобладающей, так как из-за падения напряжения ток возбуждения уменьшается, следовательно, магнитный поток Ф также уменьшается и магнитная цепь становится менее насыщенной. Затем машина переходит во все более ненасыщенное состояние (прямолинейная часть характеристики холостого хода), при этом начиная с точки *а* происходит дальнейшее уменьшение сопротивления нагрузки $R_н$. Ток I, достигнув значения $I_к$, становится меньше номинального тока нагрузки $I_{ном}$, так как определяется только потоком остаточного намагничивания. $I_{кр}$ превышает номинальное значение в 2—2,5 раза. При этом, если такое значение тока не вызовет круговой огонь по коллектору или повреждение изоляции, то такой ток не опасен для генератора.

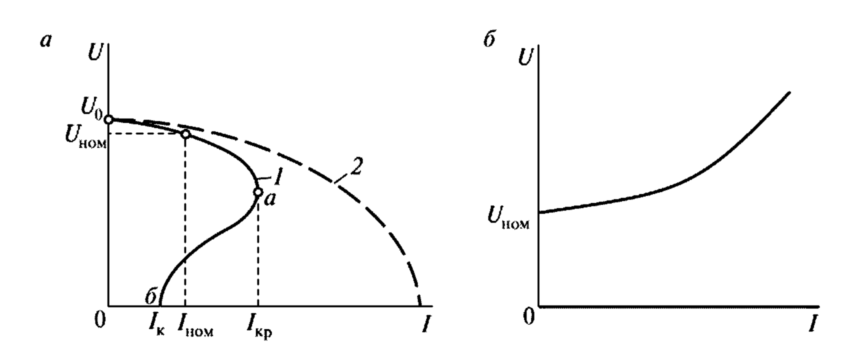


Рис. 2.32. Внешняя (*а*) и регулировочная (*б*) характеристики

Внешняя характеристика, показанная на рис. 2.32, *а* (кривая *2*), получается при постепенном уменьшении сопротивления $R_н$. Однако в реальных эксплуатационных условиях возможно так называемое ***внезапное короткое замыкание,*** при котором магнитная система машины не успевает размагнититься и ток $I_к$ достигнет опасных для машины значений $(8—18)I_{ном}$. При таком резком изменении тока на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появляется сильное искрение, которое может перейти в круговой огонь. Следовательно, внезапные к.з. генераторов параллельного возбуждения ТПС (особенно большой мощности) являются опасными, и поэтому такие генераторы нужно защищать от перегрузки и короткого замыкания. Как правило, для этого применяют плавкие предохранители, а в некоторых случаях релейную защиту, что более подробно рассмотрено в курсе «Электрические аппараты и цепи».

Регулировочная характеристика $I_в = f(I)$ при U = const и n = const (рис. 2.32, *б*) практически не отличается от соответствующей характеристики генератора с независимым возбуждением.

В генераторах последовательного возбуждения (рис. 2.33, *а*) ток возбуждения $I_в$ равен рабочему току I_a $I_в = I_a = I$ и поэтому при n = const имеются только две независимые переменные: U и I. Вследствие этого генератор имеет только одну характеристику, а именно внешнюю $U = f(I)$ при n = const (рис. 2.33, *б*). Характеристики холостого хода, нагрузочную и другие снять невозможно. Их можно снять, только переключив обмотки возбуждение на независимое возбуждение.

Так как напряжение генератора на зажимах нестабильно и сильно меняется с изменением нагрузки, то он непригоден для питания потребителей. При электрическом торможении нестабильным будет тормозной момент, а следовательно, и тормозная сила поезда. По этой причине тяговые электродвигатели, которые имеют последовательное возбуждение, при электрическом торможении переключают в режим генератора с независимым возбуждением.

В генераторах со смешанным возбуждением каждый главный полюс имеет по две обмотки, одна из которых имеет большое количество витков и включена параллельно якорю, а другая обмотка, выполненная проводом такого же сечения, как обмотка якоря, имеет малое число витков и соединена последовательно с якорем.

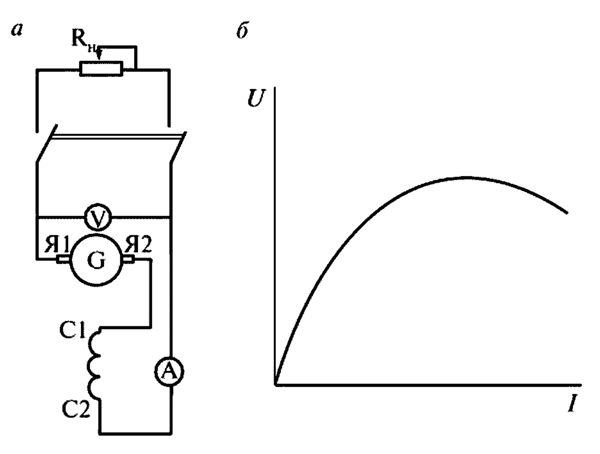


Рис. 2.33. Схема генератора с последовательным возбуждением (*а*) и внешняя характеристика (*б*) генератора

Магнитные потоки, созданные этими обмотками (параллельной и последовательной), могут быть направлены в одну сторону — согласное включение или в противоположные стороны — встречное включение. Схема генератора может быть выполнена с коротким шунтом (рис. 2.34, *а*) или с длинным шунтом (рис. 2.34, *б*). Разницы между этими схемами практически нет, так как сопротивление последовательной обмотки небольшое и падение напряжение на зажимах очень мало.

Снятие ***внешней, регулировочной и нагрузочной характеристик*** генератора смешанного возбуждения производят так же, как и у генератора параллельного возбуждения.

В режиме холостого хода генератор смешанного возбуждения работает как генератор параллельного возбуждения, так как ток последовательной обмотки возбуждения при коротком шунте равен нулю, а при длинном — ничтожно мал.

Внешняя характеристика при согласном включении — жесткая (см. рис. 2.34, *в*, кривая *1*), т.е. напряжение на зажимах генератора при увеличении тока почти не изменяется. Изменяя число витков последовательной обмотки возбуждения можно изменять положение кривой внешней характеристики. Так, увеличивая число витков последовательной обмотки возбуждения, можно получить внешнюю характеристику, у которой с увеличением тока увеличивается напряжение (см. рис. 2.34, *в*, кривая *2*).

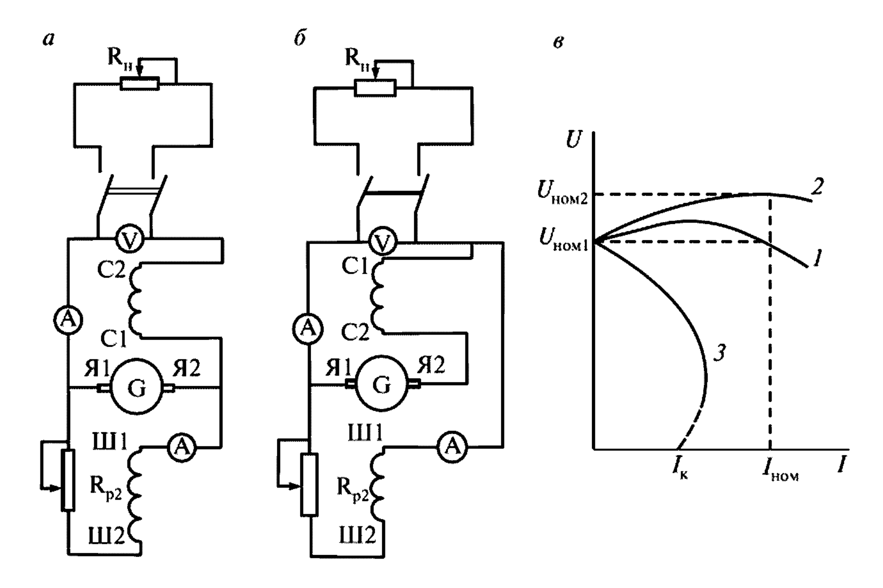


Рис. 2.34. Схемы генератора со смешанным возбуждением:
а — с коротким шунтом; *б* — с длинным шунтом; *в* — внешние характеристики

При встречном включении обмоток возбуждения получают крутопадающую внешнюю характеристику (см. рис. 2.34, *в*, кривая *3*).

Встречное включение обмоток возбуждения применяется в некоторых типах сварочных генераторов, так как их режим работы близок к режиму короткого замыкания. Согласное включение обмоток возбуждения применяется в тех случаях, когда нужно автоматически поддерживать стабильное напряжение на зажимах генератора независимо от тока нагрузки.

2.6. Электродвигатели постоянного тока

Общие сведения. На тяговом подвижном составе широко применяются двигатели постоянного тока как в качестве коллекторных тяговых электродвигателей, так и в качестве коллекторных вспомогательных машин.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока аналогично генераторам подразделяют на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Как указывалось выше, электрические машины постоянного тока облада-

ют свойством обратимости, т.е. они могут работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Рассмотрим отличие режимов генератора и двигателя. На рис. 2.35, *а* показана схема генератора постоянного тока параллельного возбуждения, а на рис. 2.35, *б* — двигателя того же возбуждения.

Главное отличие заключается в преобразовании энергии — генератор преобразует механическую энергию в электрическую, а двигатель — наоборот. Генератор необходимо всегда приводить во вращение, т.е. подводить механическую энергию, а двигатели вращаются самостоятельно от подведенной электроэнергии. Электромагнитный момент генератора является тормозным, т.е. направлен против направления вращения, а в двигателе совпадает с направлением вращения, т.е. является вращающим.

В генераторе ток и ЭДС якоря совпадают по направлению, а в двигателе направлены в противоположные стороны. Поэтому ЭДС двигателя называют противо-ЭДС.

Уравнение напряжения для цепи якоря двигателя

$$U = E + I_a R_a. \qquad (2.36)$$

Из равенства (2.36) следует, что в режиме двигателя всегда $U > E$.

Из формулы (2.36) определим значение тока

$$I = \frac{U - E}{R_a}. \qquad (2.37)$$

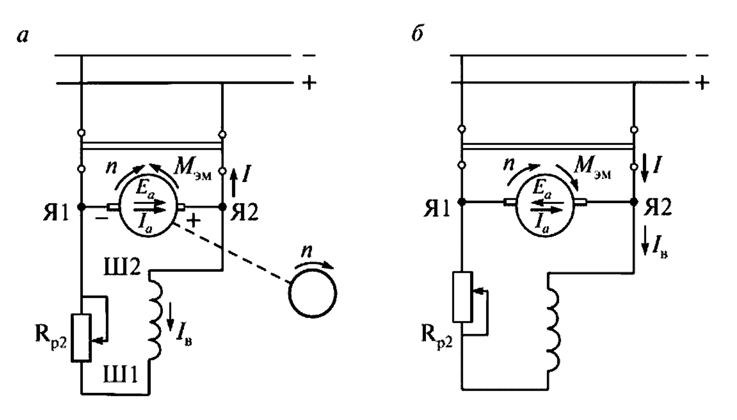


Рис. 2.35. Работа машины постоянного тока:
а — в генераторном режиме; *б* — в двигательном режиме

Электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega} = 9{,}55\frac{P_{эм}}{n} \tag{2.38}$$

расходуется на уравновешивание тормозных моментов:

– момента потерь M_0;

– момента нагрузки на валу двигателя, создаваемого приводом — устройством, которое приводит во вращение двигатель — M_2,

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}; \tag{2.39}$$

– динамического момента — $M_{дин}$.

$$M_{эм} = M_0 + M_2 \pm M_{дин}; \tag{2.40}$$

$$M_{эм} = M_{ст} \pm M_{дин}, \tag{2.41}$$

где $M_{ст} = M_0 + M_2$ — статический момент сопротивления.

При установившемся режиме, когда ω — const и $M_{дин} = 0$, $M_{эм} = M_{ст}$.

Обычно M_0 мал по сравнению с M_2, поэтому приблизительно можно считать, что при установившемся режиме работы $M_{эм} = M_{ст}$.

При вращении двигателем какого-либо устройства к его валу прикладывается момент сопротивления $M_с$, который является тормозящим и действует навстречу электромагнитному моменту двигателя $M_{эм} = M_с$.

При увеличении $M_с$, например, при движении поезда на подъем, увеличивается $M_{эм}$, вследствие чего увеличивается ток двигателя. Следовательно, как и в любой электрической цепи, ток двигателя определяет нагрузка.

Пуск двигателя. Из формулы (2.37) видно, что ток двигателя зависит от напряжения U, противо-ЭДС E и сопротивления R_a. При подаче напряжения на обмотку статора ротор из-за своей инерции не может мгновенно достичь номинальной частоты вращения, $n = 0$, следовательно, противо-ЭДС также будет равна нулю. Если напряжение в формуле (2.37) принять за 100 %, то противо-ЭДС составит 92—95 %. Тогда ток I_a будет ограничиваться только внутренним сопротивлением R_a, которое очень мало:

$$I_a = \frac{U}{R_a}. \tag{2.42}$$

Например, для тягового электродвигателя НБ-418К6 R_a составляет 0,011 Ом. Поэтому при прямом пуске с $U = U_н$ ток якоря будет недопустимо велик $I_a = (50—100)I_н$. Такая величина тока очень опасна для двигателя, так как может вызвать круговой огонь по коллектору и чрезмерно большой пусковой момент, который окажет ударное действие на вращающие части машины с последующим их разрушением. Кроме того, большой ток может вызвать падение напряжения в сети, что неблагоприятно скажется на работе других потребителей.

Из формулы (2.42) видно, что для ограничения пусковых токов необходимо или уменьшить величину питающего напряжения $U_д$, или увеличить сопротивление R_a. На ТПС применяют оба способа. На электровозах и электропоездах переменного тока и на тепловозах применяют второй способ, а на электровозах и электропоездах — первый (рис. 2.36, *а* и *б*). На тяговые электродвигатели подают напряжение $U_п$ такой величины, чтобы по обмоткам якоря протекал ток $I_п$, обеспечивающий трогание ТПС с места и не вызывающий нарушения нормальной работы тяговых электродвигателей

$$U_п = I_п R_a.$$

При включении пускового реостата в цепь двигателя

$$U_д = E + I_a (R_п + R_a), \tag{2.43}$$

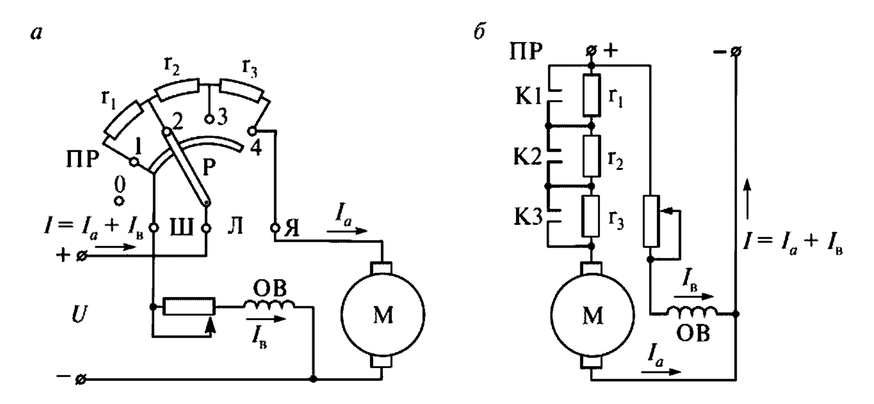


Рис. 2.36. Схемы включения двигателей через пусковые реостаты вручную (*а*) и дистанционно (*б*) с помощью контакторов

соответственно

$$I_a = \frac{U_д}{R_п + R_a}, \qquad (2.44)$$

откуда величина сопротивления пускового реостата

$$R_п = \frac{U}{I_п} - R_a. \qquad (2.45)$$

Ступени пускового реостата определяют, исходя из максимальных и минимальных величин тока.

Пуск двигателя осуществляют следующим образом (рис. 2.36, *а*). Пусковой реостат ПР включают в цепь якоря. Перед пуском двигателя необходимо рычаг Р поставить в положение 0. Затем подают напряжение и переводят рычаг на первую промежуточную позицию 1, в результате чего цепь якоря двигателя будет подключена к сети через полное сопротивление $r_{пол} = r_1 + r_2 + r_3$. Одновременно через рычаг Р и шину Ш к сети подключается обмотка возбуждения ОВ. Ток в этой обмотке не зависит от положения рычага Р, так как сопротивление шины очень мало. По обмотке якоря потечет ток, ограниченный сопротивлением якоря и пускового реостата

$$I_a = \frac{U - E}{r_{пол} + r_a}.$$

Ток якоря образует пусковой момент $M_п$, под действием которого якорь начинает вращаться. Появляется противо-ЭДС $E_a = C_e \Phi n$, что ведет к уменьшению пускового тока и пускового момента. Затем рычаг пускового реостата переключают в положение 2, 3 и 4. В положении 4 пуск двигателя заканчивается: $r_{пол} = 0$.

На рис. 2.36, *б* представлен пусковой реостат ПР тремя сопротивлениями r_1, r_2, r_3. Их выводят дистанционно с помощью контакторов К1, К2 и К3. Процесс пуска протекает так же, как и в предыдущем случае.

На тепловозах пусковых реостатов не применяют.

Реверсирование — изменение направления вращения якоря. Для реверсирования двигателя постоянного тока необходимо изменить полярность питания якоря, оставив без изменения полярность питания обмотки возбуждения или наоборот, изменить полярность

питания обмотки возбуждения, оставив без изменения полярность питания обмотки якоря.

Регулирование частоты вращения. Из формулы $E = C\Phi\omega$ или $E = C_e\Phi n$ определим частоту вращения якоря.

$$n = \frac{E}{C_e\Phi} = \frac{U - I_a\left(R_a + R_{\text{п}}\right)}{C_e\Phi}. \qquad (2.46)$$

Из формулы (2.46) следует, что частота вращения якоря зависит от величины подведенного напряжения, падения напряжения в цепи якоря, сопротивления пускового реостата, магнитного потока и конструктивных особенностей машины. Все эти способы регулирования частоты вращения якоря, кроме C_e, применяют в ТПС и подробно рассматриваются в курсах «Электрические аппараты и цепи» и «Основы тяги поездов».

Схема ***двигателя с параллельным возбуждением*** показана на рис. 2.37. Иногда этот двигатель называют *двигателем с независимым возбуждением,* так как ток обмотки возбуждения не зависит от тока якоря. В цепь якоря такого двигателя включен пусковой реостат $R_{\text{п}}$, а в цепь обмотки возбуждения — регулировочный реостат $R_{\text{рг}}$, предназначенный для изменения тока возбуждения и магнитного потока главных полюсов.

Экспериментально снимают следующие виды характеристик: *рабочие* — представляющие собой зависимости *n, M* от полезной мощности P_2; *регулировочные — n,* I_a от магнитного потока Ф; *электромеханические — n, M* от потребляемого тока; *механические — n* от *M*.

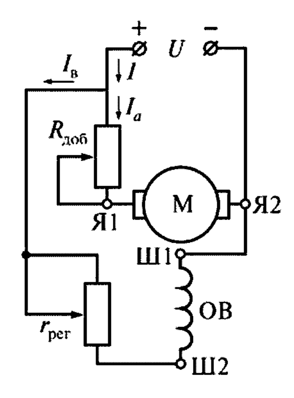


Рис. 2.37. Схема двигателя с параллельным возбуждением

Иногда электромеханические характеристики называют рабочими. Действительно, $P_2 = P_1\eta = \eta\,UI$. Так как величина напряжения *U*, питающего двигатель, принята постоянной неизменяющейся величиной, а ток является мерилом нагрузки, то можно считать, что рабочие характеристики в другом масштабе повторяют электромеханические.

В любом случае при снятии рабочих характеристик вал двигателя нагружают. В про-

стейшем случае это может быть обычная доска, которой придавливают вал двигателя, создавая тормозной момент. Для тягового электродвигателя — это масса поезда, сопротивление воздуха, профиль пути и другие факторы, создающие сопротивление движению.

При увеличении тормозного момента увеличивается ток двигателя, но магнитный поток главных полюсов несколько уменьшается из-за действия реакции якоря. Вследствие этого частота вращения n в соответствии с выражением (2.46) будет возрастать (рис. 2.38, *а*). Но падение напряжения $I_a R_a$ вызовет уменьшение частоты вращения. Ввиду того что влияние реакции якоря меньше, чем падение напряжения $I_a R_a$, при U = const и $I_в$ = const характеристика $n = f(I_a)$ имеет наклон к оси абсцисс и по этой причине характеристика криволинейна. Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах, называют ***номинальным изменением частоты вращения***

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_{ном}}{n_{ном}} \cdot 100\,\%. \tag{2.47}$$

Обычно для двигателей параллельного возбуждения Δn = 2—8 %, поэтому данную характеристику частоты вращения называют *жесткой*.

Зависимость полезного момента M_2 от нагрузки установлена формулой (2.42). С увеличением нагрузки частота вращения двигателя снижается. При n = const вращающий момент двигателя $M = M_0 + M_2$. Рабочие характеристики строят при условии $I_в$ = const, что обеспечивает постоянство магнитных потерь, и M_0 = = const. Поэтому график зависимости $M = f(I_a)$ проходит параллельно кривой $M_2 = f(I_a)$.

Если пренебречь реакцией якоря, то можно принять Ф = const. Тогда механическая характеристика указанного двигателя будет представлять собой прямую линию, несколько наклоненную к оси абсцисс. Угол наклона механической характеристики тем больше, чем больше значение сопротивления R, включенного в цепь якоря (рис. 2.38, *б*).

При изменении напряжения на якоре U изменяется частота вращения n, а Δn остается неизменной. В итоге характеристики смещаются по высоте (рис. 2.38, *в*), оставаясь параллельными друг другу.

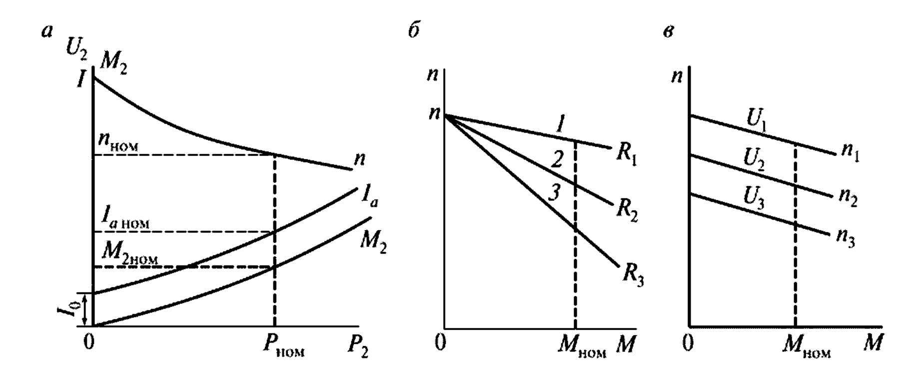


Рис. 2.38. Характеристики двигателя с параллельным возбуждением: *а* — рабочие характеристики U_2, M_2; механические характеристики $n(M)$ при изменении R (*б*) и U (*в*)

Схема ***двигателя с последовательным возбуждением*** показана на рис. 2.39, *а*. Обмотка возбуждения двигателя включена последовательно с его якорем, в связи с чем ток возбуждения, а следовательно, и магнитный поток главных полюсов определяется нагрузкой на валу двигателя

$$I_в = I_a = I. \tag{2.48}$$

Следовательно

$$\Phi = k_ф I. \tag{2.49}$$

Коэффициент пропорциональности $k_ф$ в значительном интервале нагрузок (при $I < I_н$) практически постоянен, и лишь при $I > (0{,}8–0{,}9)I_н$ вследствие насыщения магнитной цепи начинает несколько уменьшаться. В формулу частоты вращения $n = (U - I_a R_a)/C_e\Phi$ и момента $M = C_м \Phi I_a$ подставим (2.45) и получим выражения

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e k_ф I}; \tag{2.50}$$

$$M = C_м k_ф I^2. \tag{2.51}$$

При магнитном насыщении справедливы выражения (2.19) и (2.41).

Рабочие характеристики показаны на рис. 2.39, *б*. Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения вначале

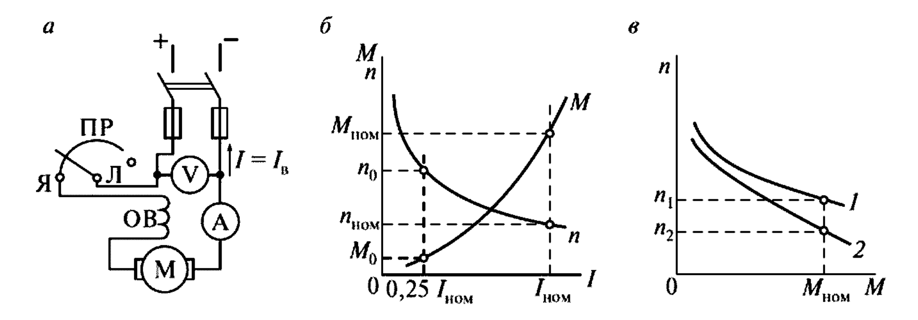


Рис. 2.39. Схема двигателя с последовательным возбуждением (*а*) и его характеристики — рабочие (*б*) и механические (*в*)

имеет гиперболический характер. По мере увеличения тока двигатель насыщается все сильнее и его частота вращения начинает изменяться по линейному закону, так как обратно-пропорциональная зависимость между частотой вращения *n* и током *I* нарушается, а также пропорциональная зависимость между *M* и *I* (см. штриховые линии, рис. 2.39, *б*).

Однако следует обратить внимание на то, что при значительном уменьшении нагрузки двигатель начинает развивать все бóльшую частоту вращения или, как говорят, начинает «идти вразнос». При холостом ходе Ф = 0 частота вращения двигателя приобретает опасные значения по своим механическим последствиям — выпадение клиньев, крепящих обмотку якоря, разрыв бандажей и т.д.

Поэтому двигатель последовательного возбуждения нельзя включать в сеть при нагрузке менее 25—30 % от номинальной. Также нельзя применять для соединения вала двигателя с рабочим органом (нагрузкой) фрикционную или ременную передачи из-за их возможного проскальзывания.

Регулирование частоты вращения двигателя изменением величины питающего напряжения, можно производить только в сторону уменьшения напряжения от номинального до нуля, как и у двигателя с параллельным возбуждением, в результате чего получим семейство кривых (рис. 2.39, *в*). Этот способ широко применяется в ТПС.

Регулирование частоты вращения двигателя включением сопротивления последовательно с обмоткой якоря позволяет регулировать *n* от нуля до номинального значения. Однако в реостате теряется мно-

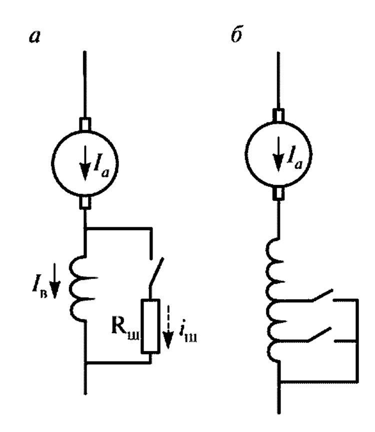


Рис. 2.40. Регулирование частоты вращения двигателя ослаблением возбуждения:
а — включением шунтирующего сопротивления; *б* — отключением части витков обмотки возбуждения

го энергии, потребляемой из контактной сети, что вызывает снижение КПД электроподвижного состава и нагрев самого реостата. Поэтому его включают кратковременно только на период пуска и разгона ЭПС и называют *пусковым реостатом.*

Регулирование частоты вращения двигателя ослаблением возбуждения производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением $R_ш$ (рис. 2.40, *а*), либо изменением числа витков (рис. 2,40, *б*). Степень шунтирования определяется выражением

$$\beta = \frac{I_в}{I_a}. \tag{2.52}$$

Через обмотку возбуждения проходит только часть тока якоря i_a, а остальная его часть проходит через резистор $R_ш$. При меньшем токе возбуждения (по сравнению с током якоря) в магнитном системе наводится меньший магнитный поток и, как следует из формулы (2.42), частота вращения при том же токе получается больше, чем в режиме полного возбуждения, при котором весь ток якоря проходит по обмоткам возбуждения. Обычно через контакты включают несколько резисторов, в результате чего получают несколько ступеней возбуждения.

Второй способ изменения возбуждения основан на отключении части витков катушек. Каждая катушка должна быть секционирована, и из нее нужно делать дополнительные выводы. Этот способ ослабления возбуждения не нашел применения на ТПС из-за усложнения конструкции тяговых электродвигателей, так как для каждой ступени ослабления возбуждения необходимо добавлять по одному выводу из каждой ступени ослабления возбуждения, размещения которых в ограниченных габаритах двигателя практически невозможно.

В связи с тем что регулирование частоты вращения за счет изменения величины магнитного потока тягового электродвигателя используют в широком диапазоне, на локомотивах применяют несколько ступеней ослабления возбуждения — от двух до шести. В этом случае преимущественно используют способ ослабления возбуждения шунтированием обмотки возбуждения.

Двигатель со смешанным возбуждением (рис. 2.41, *а*), как и генератор смешанного возбуждения, имеет на каждом полюсе по две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e\left(\Phi_1 \pm \Phi_2\right)}, \qquad (2.53)$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения. Знак плюс соответствует согласному включению обмоток возбуждения, а знак минус — встречному.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующий магнитный поток с увеличением нагрузки возрастает, что приводит к уменьшению частоты вращения двигателя. Характеристика частоты вращения будет располагаться между характеристиками двигателя параллельного и последовательного возбуждений. Магнитодвижущая сила обмотки параллельного возбуждения ограни-

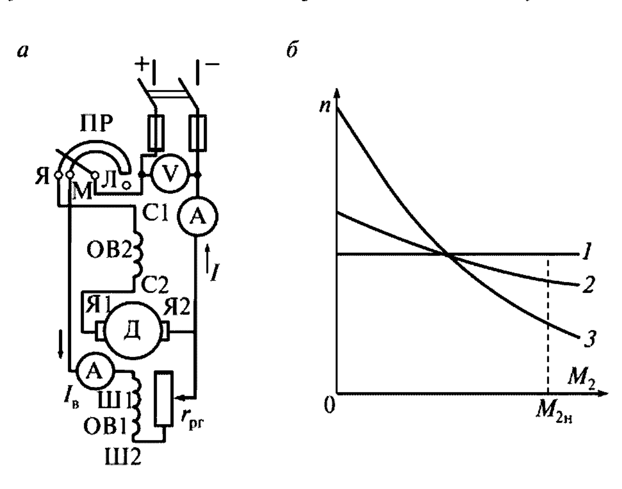


Рис. 2.41. Двигатель смешанного возбуждения и его характеристики:
а — схема двигателя; *б* — характеристики частоты вращения при встречном (1) и согласном (2) включении обмоток возбуждения

чивает частоту вращения при малых нагрузках. При больших значениях этой магнитодвижущей силы изменения частоты вращения определяется, в основном, падением напряжения в цепи якоря (линия *2*, рис. 2.41, *б*); при малых значениях магнитодвижущей силы характеристика частоты вращения приближается к характеристике двигателя последовательного возбуждения (линия *3*).

Встречное включение обмоток применяют в тех случаях, когда необходимо получить неизменную частоту вращения (линия *1*) или увеличение частоты вращения при увеличении нагрузки.

Двигатель со смешанным возбуждением применяют в условиях, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы значительные изменения частоты вращения при изменении нагрузки. Этот двигатель может работать вхолостую, так как магнитный поток параллельной обмотки возбуждения $Ф_1$ ограничивает частоту вращения двигателя в режиме холостого хода и устраняет опасность «разноса». Но двигатель смешанного возбуждения, имеющий на каждом полюсе по две обмотки возбуждения, более дорогостоящий по сравнению с двигателями рассмотренных выше типов, что несколько ограничивает его применение.

2.7. Тяговые машины постоянного тока

Условия работы тяговых машин тепловозов. Тяговые генераторы и электродвигатели тепловозов по сравнению с общепромышленными работают в более тяжелых условиях: при повышенных вибрациях, на высотах до 1200 м над уровнем моря, при резких изменениях температуры (на 20—30 °С в течение 2—3 часов), при выпадении росы, в запыленном или влажном воздухе, при низких температурах от –50 до +40 °С для умеренного исполнения У, а для особо холодных районов (например, Байкало-Амурская железная дорога) в исполнении УХЛ от –60 до +40 °С.

Эти обстоятельства учитывают при расчете, конструировании, разработке и технологии изготовления тяговых генераторов тепловозов. Требования, которым должны соответствовать электрические машины, определены стандартом ГОСТ 2582-81 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общетехнические условия». Из-за ограниченных габаритов мощность тяговых машин на единицу массы и объема по сравнению с машинами общепромышленного применения должна быть значительно выше. В то же

время их надежность и безотказность должны быть очень высокими, так как эти показатели существенно влияют на безопасность движения поездов.

Поэтому основные детали тяговых электрических машин имеют ряд особенностей при изготовлении. Обмотки выполняют с классами по нагревостойкости изоляции только F, H и C, хотя ранее изготовлялись класса B.

Для повышения электрической и механической прочности, долговечности изолированные обмотки машин пропитывают в термореактивном лаке и запекают. Открытые поверхности токопроводящих частей машины покрывают электроизоляционным лаком и сушат при высокой температуре. Пазы сердечников якорей выстилают пленочной стеклотканью. Лобовые части обмоток якорей закрепляют бандажами, выполненными из высокопрочной и теплостойкой стеклобандажной ленты, пропитанной термореактивным лаком. Все тяговые машины имеют воздушное охлаждение, для которого используют, как правило, независимую нагнетательную вентиляцию.

Коллекторы изготовляют из меди, но для повышения износостойкости медь легируют кадмием или серебром. «Петушки» коллектора тягового генератора могут быть жесткими или гибкими. Жесткие «петушки» выполняют из профиля пластины и припаивают к коллекторной пластине медно-фосфористым припоем. «Петушки» коллекторных пластин тяговых электродвигателей вырубают заодно с пластиной, а для уменьшения массы в ее центре высверливают отверстие.

Щетки, помещенные в щеткодержатели, располагают на геометрической нейтрали. Постоянное нажатие на щетки обеспечивается использованием стальных рулонных пружин.

Для несущих деталей, а также сборочных литых и сварных единиц применяют высококачественную сталь с улучшенной термической и механической обработкой. Соединение деталей путем посадок производят с повышенными натягами.

2.7.1. Тяговые генераторы

Устройство тягового генератора **ГП-311Б.** Тяговые генераторы предназначены для преобразования механической энергии дизеля в электрическую, которая передается тяговым электродвигателям. В момент пуска дизеля тяговые генераторы работают кратковре-

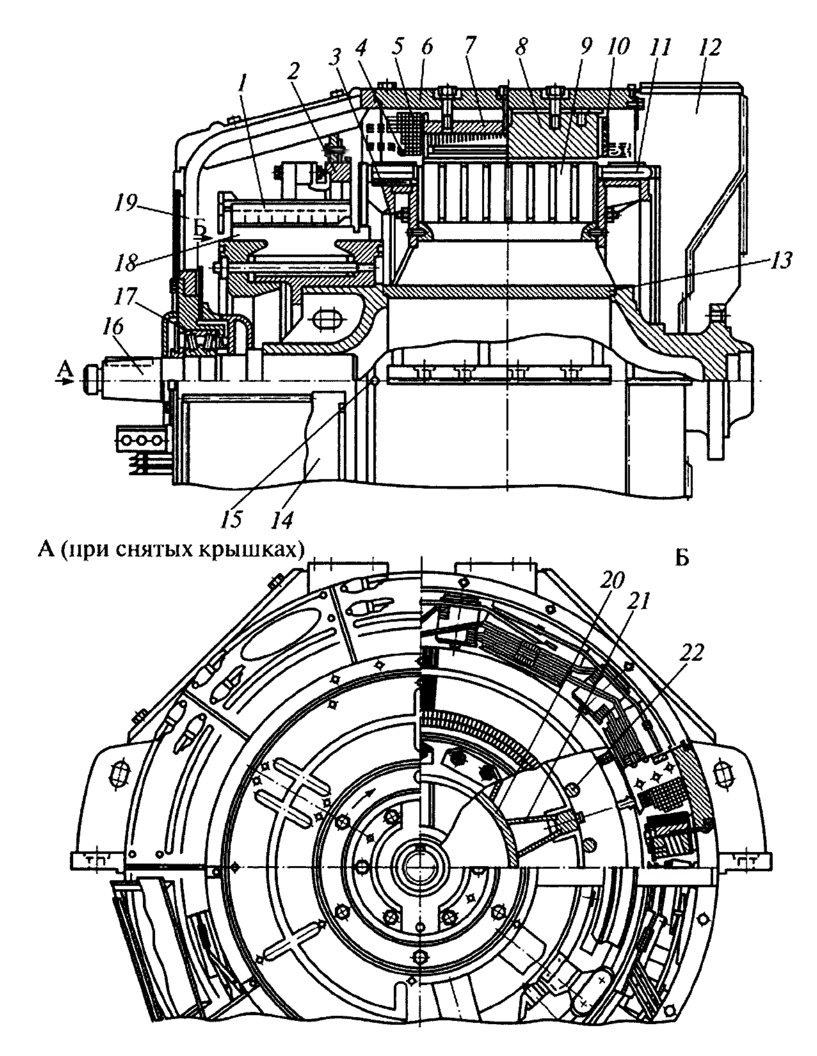


Рис. 2.42. Генератор ГП-311Б:

1 — щеткодержатель; *2* — поворотная траверса; *3* — уравнительные соединения; *4* — пусковая обмотка; *5* — обмотка независимого возбуждения; *6* — станина; *7* — сердечник главного полюса; *8* — сердечник добавочного полюса; *9* — сердечник якоря; *10* — катушка добавочного полюса; *11* — обмотка якоря; *12* — воздухоподводящий патрубок; *13* — корпус якоря; *14* — щитки; *15* — штифт для фиксации щита со станиной; *16* — вал; *17* — подшипник; *18* — коллектор; *19* — подшипниковый щип; *20* — барабан; *21* — продольные ребра; *22* — шпильки

менно в режиме электродвигателя с последовательным возбуждением, получающего питание от аккумуляторной батареи и приводящего во вращение коленчатый вал дизеля. На рис. 2.42 изображен общий вид генератора ГП-311Б, который является наиболее типичным по конструкции.

Магнитная система генератора состоит из станины *6*, главных и добавочных полюсов. Станина состоит из кольцевого магнитопровода и изготовлена из толстолистового проката с малым содержанием углерода. К станине приварены две опорные лапы, с помощью которых она закреплена на поддизельной раме. На лапах имеются по четыре отверстия для крепления генератора к раме и по два отверстия с резьбой для отжимных болтов.

Главные полюса (рис. 2.43) состоят из сердечника и катушек обмоток. Сердечник изготовлен из отдельных листов электротехнической стали толщиной 1 мм, которые изолированы друг от друга лаком, опрессованы с давлением 29 МПа и стянуты заклепками. В сердечнике выштамповано прямоугольное отверстие, куда запрессован стержень с резьбовыми отверстиями для крепления сердечника полюса к станине.

На каждом полюсе находятся катушки обмоток независимого возбуждения *2* и пусковой *3*. Катушки намотаны на каркас *4*, выполненный из листовой стали толщиной 1 мм, имеющий отогнутые бурты и удерживающие рамки, изготовленные из прочной и теплостойкой пластмассы. Изоляция каркаса состоит из четырех слоев гибкого стекломиканита на кремнийорганическом лаке и одного слоя микаленты. Пусковая обмотка выполнена в виде отдельной шайбы и расположена у полюсного наконечника, рядом установлена стеклотекстолитовая изоляционная шайба *6*, выше которой расположена обмотка независимого возбуждения. При таком расположении обмоток обеспечивается хороший отвод тепла.

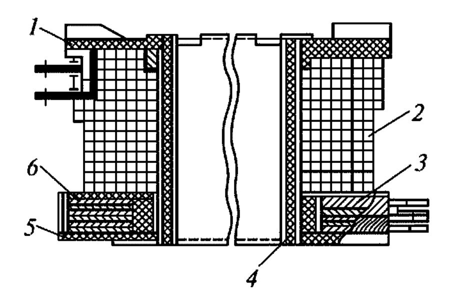


Рис. 2.43. Катушка главного полюса генератора ГП-311Б:
1, *5* — изоляционные рамки; *2* — обмотка независимого возбуждения; *3* — пусковая обмотка; *4* — каркас; *6* — изоляционная шайба

Витки пусковой обмотки изолированы асбестовой электроизоляционной бумагой, пропитанной в лаке; сверху катушка покрыта стеклолентой, пропитанной в том же лаке, после этого катушку пропитывают кремнийорганическим лаком окунанием. В процессе намотки каждый слой катушки независимого возбуждения промазывают кремнийорганическим лаком или компаундом. Пустоты заполняют замазкой П-11. Готовую катушку пропитывают в кремнийорганическом лаке, запекают и покрывают электроизоляционной эмалью. Из десяти главных полюсов генератора пять имеют перекрещенные выводы, а пять — открытые. Это сделано для чередования полярности полюсов и упрощения конструкции соединительных шин.

Добавочные полюсы (рис. 2.44), так же как и главные, состоят из сердечника и катушки. Сердечники изготовлены из толстолистовой стали Ст3. Они сужены в части, обращенной к якорю, внизу к сердечнику приклепаны латунные или дюралюминиевые угольники *5*. Сердечник полюса изолирован от катушки спрессованным и спеченным миканитом или стеклотканью на эпоксидной смоле. Катушка опирается на угольники и фиксируется стальной накладкой и пружинной рамкой для предотвращения перемещения катушки по сердечнику из-за усыхания изоляции и других деформаций.

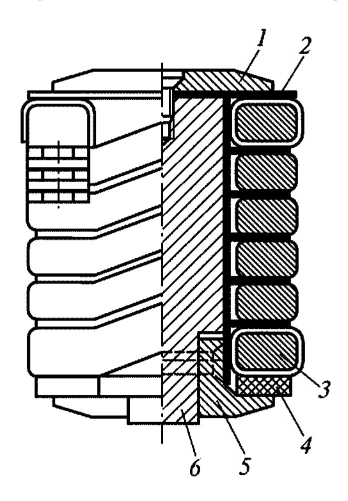


Рис. 2.44. Добавочный полюс генератора ГП-311Б:
1 — накладка; *2* — прокладка; *3* — катушка; *4* — изоляционная рамка; *5* — угольники; *6* — сердечник добавочного полюса

Для уменьшения магнитного насыщения между станиной и сердечником помещена текстолитовая прокладка *2*. Там же помещен набор из шести стальных прокладок общей толщиной 3 мм, служащих для регулирования воздушного зазора под добавочным полюсом при настройке коммутации. Между витками катушки полюса помещены стеклотекстолитовые прокладки, крайние витки катушки изолированы микалентой

и стеклолентой. Обмотка добавочных полюсов всегда соединена последовательно с обмоткой якоря.

Якорь тягового генератора (см. рис. 2.42) состоит из вала *16*, корпуса *13*, сердечника *9*, обмотки *4* и коллектора *18*. Якоря тяговых генераторов изготовляют с укороченным валом — полувалом, т.е. применяют так называемую «безвальную конструкцию», позволяющую снизить температуру нагрева обмотки, трудоемкость изготовления и ремонта, а также массу тягового генератора. Один конец полувала запрессован в барабан *20*, состоящий из переднего и заднего фланцев, соединенных между собой продольными и поперечными ребрами. Задний фланец используют для соединения с валом дизеля, а передний — для напрессовки коллектора. Сердечник якоря состоит из пяти сегментов, стянутых шпильками в осевом направлении. В радиальном направлении сердечник закреплен встречными шпонками, закладываемыми в пазы сегментов и ребер.

В нагретом состоянии сердечника встречно закладывают клиновые шпонки в пазы сегментов и ребер. Этим обеспечивается натяг между сердечником и корпусом. Для образования радиальных каналов в осевом направлении сердечник разделен вентиляционными распорками на восемь пакетов. В сердечнике якоря выштамповано 155 пазов для укладки обмотки якоря.

Обмотка якоря сложная петлевая, двухходовая; первые выпуски генераторов имели комбинированные обмотки. Катушка обмотки состоит из пяти элементарных одновитковых секций (рис. 2.45). В каждом пазу якоря уложены 30 стержней (пять рядов по шесть стержней) из шинной меди сечением 2,83×6,5 мм.

Корпусная изоляция якорной обмотки выполнена тремя слоями стеклослюдинитовой ленты ЛСПЭ-934-ТП и одним слоем стеклоленты ЛЭС в полуперекрышу, кроме того, паз выстлан пленочной стеклотканью. Каждый проводник изолирован одним слоем стеклослюдинитовой ленты ЛС в полуперекрышу, а все шесть проводников изолированы стеклолентой ЛСЭ, пропитанной в лаке КО-916К. Обмотка якоря удерживается в пазах текстолитовыми клиньями. После укладки в пазы якоря обмотку пропитывают в изоляционном лаке вакуум-нагнетательным способом и запекают для обеспечения монолитности конструкции. Уравнительные соединения выполнены из меди.

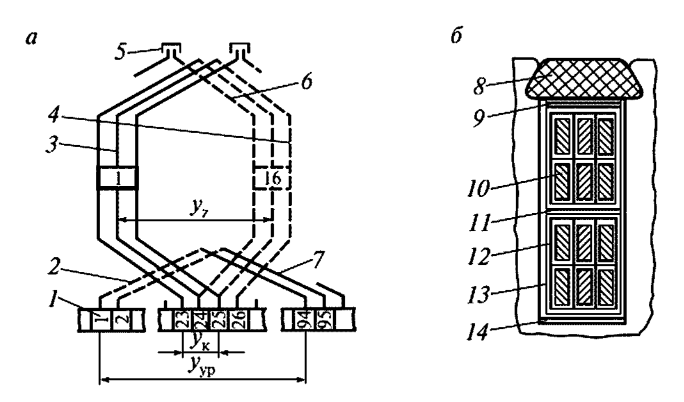


Рис. 2.45. Сложная петлевая обмотка якоря:
а — схема катушек и уравнительных соединений; *б* — разрез обмотки в пазу; *1* — пластины коллектора; *2, 7* — нижняя и верхняя стороны уравнительных соединений; *3, 4* — верхняя и нижняя стороны катушки; *5* — соединительная гильза; *6* — секция катушки, переходящая в следующий паз; *8* — клин пазовый; *9, 11, 14* — изоляционные прокладки; *10* — провод катушки; *12* — изоляция катушки от корпуса; *13* — изоляционная выстилка паза

Коллектор генератора собран из 465 пластин твердотянутой меди с присадкой серебра от 0,07 до 0,14 % или кадмия. Присадки увеличивают износоустойчивость коллектора. Пластины изолированы друг от друга миканитовыми прокладками толщиной 1 мм. Нижняя часть пластин имеет форму «ласточкина хвоста», с помощью которого закреплен стальными конусными нажимными шайбами. Между конусными шайбами и коллекторными пластинами помещена миканитовая манжета толщиной 1 мм на глифталевом лаке. Выступающую часть манжеты предохраняют от повреждения бандажом и покрывают, как и торцевые части пластин, изоляционной эмалью. Для предотвращения попадания влаги под коллекторные пластины уплотняют места посадки нажимной шайбы на корпус коллектора с помощью пропитанного шнура и промазки стыка снаружи густыми цинковыми белилами. Коллектор стянут 18 шпильками из легированной стали, термически обработанными для достижения высокой прочности и вязкости.

Сами коллекторные пластины выполнены сборными с ленточными «петушками», которые припаивают твердым припоем к пластине. Для уменьшения массы пластин в них сделаны отверстия.

Коллектор обтачивают и шлифуют после сборки с якорем.

Подшипниковый щит воспринимает большие нагрузки. Чтобы не допускать вибрации и смещения щеткодержателей, щит имеет сварную конструкцию, состоящую из ребер и колец. Ребра наклонены к оси машины, что обеспечивает жесткость и легкость конструкции. В центральной части щита образуется кольцо, к которому крепится крышка. Такая конструкция позволяет снять крышку и заменить подшипник без снятия подшипникового щита.

Патрубок предназначен для подвода охлаждающего воздуха к генератору и выполнен сварным из тонколистовой стали и имеет разъемы по вертикальной и горизонтальной осям. Он также является щитом, закрывающим детали генератора со стороны дизеля.

Траверса и щеткодержатели. Корпус щеткодержателя отлит из кремнистой латуни и имеет одно гнездо (рис. 2.46), в котором устанавливают разрезную щетку *2* с резиновым амортизатором (накладкой) *3* толщиной 12 мм. Амортизатор имеет прямоугольный выступ, входящий в соответствующий паз на верхнем торце щетки. Благодаря амортизаторам увеличивается срок службы щеток, улучшается коммутация и ликвидируются отколы щеток.

Щетка ЭГ-74 имеет размер 12,5×32×65/60 мм. Нажатие на щетку обеспечивается спиральными пружинами *6* через пальцы *5*. Из-

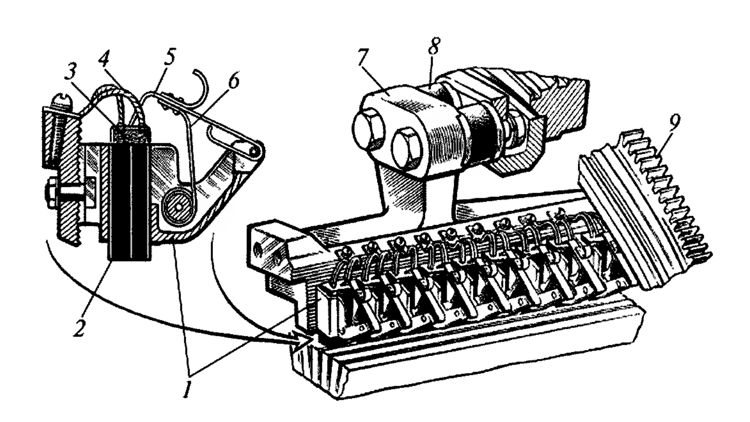


Рис. 2.46. Щеткодержатели:
1 — корпус щеткодержателя; *2* — щетка; *3* — резиновый амортизатор; *4* — шунт; *5* — нажимной палец; *6* — пружина; *7* — бракет; *8* — изолятор; *9* — поворотная траверса

меняя затяжку пружины, регулируют силу нажатия, которая должна быть 8—12 Н.

Между щеткодержателем и коллектором должен быть зазор 2—3 мм, который регулируется прорезью в корпусе щеткодержателя под болтом и использованием гребенчатых (рифленых) привалочных поверхностей щеткодержателя.

Щеткодержатели крепят к бракету *7*, на каждом из которых укреплено по девять щеткодержателей. Количество бракетов со щеткодержателями соответствует числу главных полюсов. Бракетом называют устройство, на котором крепятся несколько щеткодержателей. Бракет отливают из алюминиевого сплава и крепят к поворотной траверсе двумя изоляционными подвесками, изготовленными из микалекса, армированного специальным болтом с одной стороны и гайкой с другой. Бракеты располагают на траверсе таким образом, чтобы оси щеток находились на нейтрали. Траверса *9* представляет собой легкую поворотную конструкцию из двух колец, соединенных ребрами по числу полюсов, к которым прикреплены бракеты. На наружной стороне колец нарезаны зубья. Для привода траверсы на подшипниковом щите установлена шестерня, имеющая зацепление с траверсой. Поворот траверсы на 360° осуществляется при помощи валоповоротного устройства дизеля.

***Тяговый генератор* TD-802** устанавливается на тепловозах ЧМЭ3, ЧМЭ3Т, ЧМЭ3Э и представляет собой десятиполюсную машину постоянного тока независимого возбуждения с самовентиляцией. Он состоит из станины, подшипникового щита, главных и добавочных полюсов, якоря с коллектором, траверсы со щеткодержателями и щетками, заднего щита.

Цилиндрическая станина 9 (рис. 2.47) является частью магнитной цепи машины. Поэтому она изготовлена из стали с толщиной стенок 51 мм с хорошей магнитной проводимостью. С обеих сторон станины приварены лапы *28* для крепления на поддизельной раме и втулки *27* с резьбой под болты. К станине также приварены восемь кронштейнов *25* для крепления заднего щита *2*.

К внутренней стороне станины прикреплены десять *главных 7* и десять *добавочных 24* полюсов. Каждый из полюсов закреплен двумя болтами *33*, под головки которых поставлены пружинные разрезные шайбы. Сердечники главных полюсов набраны из отдельных листов электротехнической стали толщиной 1 мм, изолированных

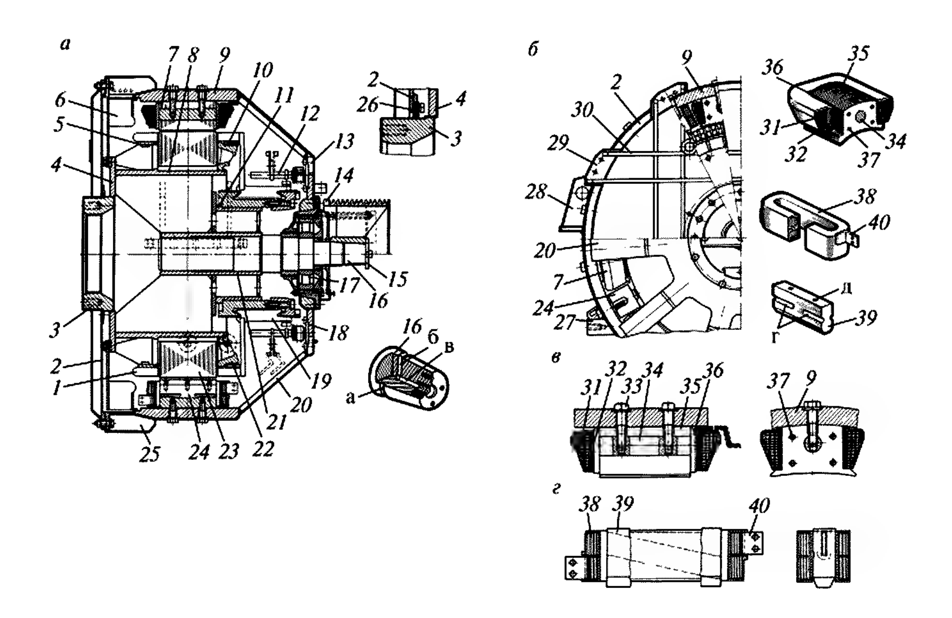


Рис. 2.47. Тяговый генератор TD-802:

а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез; *в* — главный полюс и его крепление; *г* — добавочный полюс; *1* — обмотка якоря; *2* — задний щит; *3* — фланец; *4* — диск; *5* — задний обмоткодержатель; *6* — вентиляторное колесо; *7* — главный полюс; *8* — барабан; *9* — станина; *10* — уравнительные соединения; *11*, *27* — втулки; *12* — щеткодержатели; *13* — подшипниковый щит; *14* — шкив; *15* — шайба; *16* — вал; *17* — роликовый подшипник; *18* — траверса; *19* — коллектор; *20*, *30* — ребра; *21* — ступица; *22* — передняя нажимная шайба; *23* — сердечник якоря; *24* — добавочный полюс; *25* — кронштейн; *26* — текстолитовое кольцо; *28* — опорная лапа; *29*, *36* — пластины; *31*, *32* — независимая и пусковая обмотки возбуждения; *33* — болт; *34* — стержень; *35* — сердечник главного полюса; *37* — заклепка; *38* — катушка добавочного полюса; *39* — сердечник добавочного полюса; *40* — вывод катушки; а — кольцевая канавка; б, в — радиальное и осевое отверстия; г — продольный паз; д — резьбовое отверстие

друг от друга лаком. Для предотвращения распушения сердечника крайние листы *36* имеют толщину 16 мм. Листы спрессованы и стянуты четырьмя заклепками *37* толщиной 16 мм. Концы заклепок приваривают к пластинам *36*, для чего отверстия под заклепки в крайних листах раззенкованы. В центре сердечника выштамповано отверстие, в которое запрессован стержень *34* с двумя резьбовыми отверстиями под крепежные болты.

На каждом главном полюсе находятся по две катушки возбуждения: пусковая *32* и независимая *31*. Пусковая катушка состоит из четырех витков провода из изолированной полосовой меди. Катушки пусковой обмотки соединены перемычками из полосовой меди.

Независимая катушка возбуждения выполнена медным изолированным проводом прямоугольного сечения и содержит 63,5 витка. Катушки независимой обмотки соединены перемычками из многожильного медного провода.

Сердечник *39* добавочного полюса изготовлен из стального проката и заострен со стороны якоря. С противоположной стороны сердечника выполнены два резьбовых отверстия *д* под крепежные болты и четыре продольных паза *г* (по два с каждой стороны) для крепления катушки. Катушка *38* добавочного полюса содержит 9,5 витков полосовой меди, намотанной в два слоя. К концам катушек припаяны выводы *40*.

Якорь генератора состоит из сварного корпуса с коротким валом, сердечника, обмотки и коллектора. Вал *16* запрессован в ступицу *21*, соединенную восемью ребрами со стальным барабаном *8*. На барабан напрессован сердечник *23*, выполненный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, изолированных друг от друга лаком. Для предотвращения распушения листов сердечника якоря восемь крайних листов имеют толщину 2 мм. В сердечнике выполнены вентиляционные отверстия диаметром 35 мм и пазы, куда укладывают обмотку *1* якоря. При сборке листы сердечника напрессовывают на барабан *8* со шпонкой до упора на барабане и на нажимной шайбе с обмоткодержателем *5*. В собранном виде сердечник удерживается также отлитой из стали нажимной шайбой *22*, которая напрессована на барабан и дополнительно застопорена кольцом.

Обмотка якоря петлевая. Каждая катушка (рис. 2.48) состоит из трех одновитковых секций, причем каждый виток выполнен в виде двух медных изолированных лент *2* прямоугольного сечения, расположенных друг над другом. На дно паза и между катушками уложены изоляционные прокладки *4* и *7*. Пазовая изоляция *5* изолирует обе стороны от сердечника якоря *6*. Обмотка якоря закреплена в пазах текстолитовыми клиньями *1*. Передние и задние лобовые части закреплены проволочными бандажами.

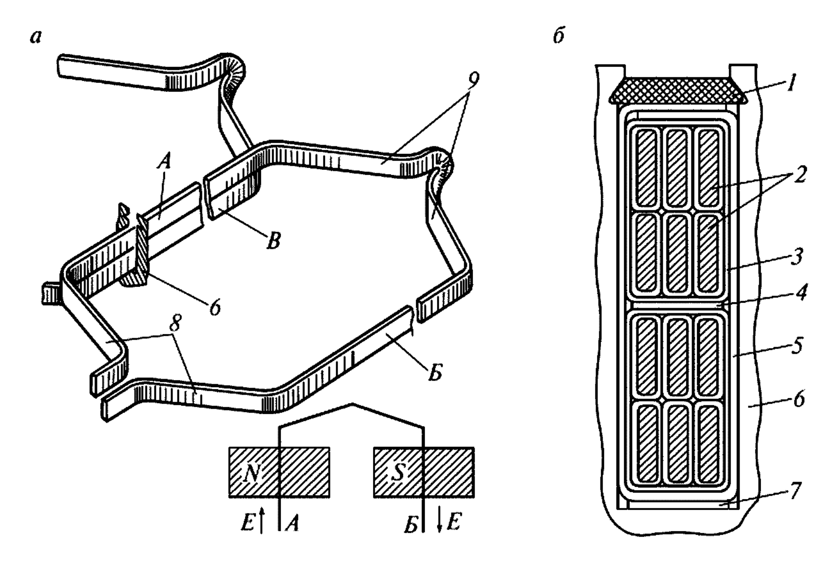


Рис. 2.48. Катушка якорной обмотки (*а*) и укладка их в пазу (*б*):
1 — текстолитовый клин; *2* — медные изолированные ленты (провода); *3* — стеклолента; *4*, *7* — изоляционные прокладки; *5* — пазовая изоляция; *6* — сердечник якоря; *8*, *9* — передняя и задняя лобовые части; *А*, *Б*, *В* — активные стороны катушек

Под передними лобовыми частями в выемке нажимной шайбы расположены уравнительные соединения *10* (см. рис. 2.47, *а*). Втулка *11* при помощи двух дисков приварена к ступице корпуса. На втулку напрессован коллектор *19*.

Пластины *коллектора* закреплены стальными клиньями и болтами изолированы друг от друга миканитовыми прокладками. Для изоляции пластин от стальных клиньев служат две миканитовые манжеты и миканитовый цилиндр. Выступающий конец передней манжеты закреплен веревочным бандажом и покрыт изоляционной эмалью.

С противоположной стороны от коллектора к торцу барабана *8* (см. рис. 2.47, *а*) приварен стальной диск *4*, к которому прикреплено болтами с лепестковыми шайбами стальное *вентиляторное колесо 6*, имеющее 35 лопаток. Дополнительная фиксация вентиляторного колеса осуществляется двумя штифтами.

В расточку диска *4* вставлен и приварен стальной цилиндрический фланец *3*, соединенный двенадцатью болтами с фланцем ко-

ленчатого вала дизеля. Таким образом, якорь одним концом опирается на коренной подшипник коленчатого вала, а другим — на роликовый подшипник *17*, который установлен в подшипниковом щите *13* — стальном фланце. К выступам фланца приварены десять наклонных ребер *20*, соединяющих его со станиной.

На конусную часть вала *16* (см. рис. 2.47, *а*) напрессован шкив *14*, имеющий 13 ручьев под клиновые ремни для привода двухмашинного агрегата и вентилятора охлаждения тяговых электродвигателей задней тележки. Шкив дополнительно закреплен шайбой *15* и двумя болтами, ввернутыми в торец вала.

На торце вала имеется отверстие в с резьбой М20 под штуцер гидравлического пресса, позволяющий снимать шкив. Отверстие в соединено радиальным отверстием б диаметром 4 мм с кольцевой канавкой а шириной 3 мм, проточенной на наружной поверхности конусной части вала.

В генераторе имеется траверса *18*, на которой установлены десять комплектов *щеткодержателей 12*. Траверса прикреплена к подшипниковому щиту *13* десятью болтами М16. Отверстия под болты имеют овальную форму, благодаря чему можно поворачивать траверсу при настройке коммутации.

Для предотвращения попадания смазки от подшипника внутрь генератора предусмотрено лабиринтное уплотнение, образованное лабиринтным кольцом *5* (рис. 2.49, *а*) и задней крышкой *3*. С противоположной стороны подшипник закрыт передней крышкой *11* и маслоотражательным диском *8*, прикрепленным шестью болтами к напрессованному на вал кольцу *9*. Крышки *3* и *11* отлиты из чугуна и стянуты восемью болтами *1*, проходящими через отверстия в подшипниковом щите *6*.

На траверсе *23* (рис. 2.49, *б*) имеются гнезда *22* для крепления комплектов щеткодержателей. Каждый комплект состоит из пяти латунных щеткодержателей *12*, укрепленных при помощи зажимов *14* на общей латунной трубке *15*. В каждый щеткодержатель помещено по одной разрезной щетке *13*, прижимаемой к коллектору пластинчатой пружиной *25*. Шунты *24* щеток прикреплены болтами к зажимам. В трубку *15* запрессован стальной палец *17*. Второй конец трубки закреплен в пластмассовом изоляторе *19*. При сборке пластмассовый изолятор вставляют в гнездо *22* траверсы *23* и укрепляют в нем накладкой *21* с двумя болтами *20*. К трубке припа-

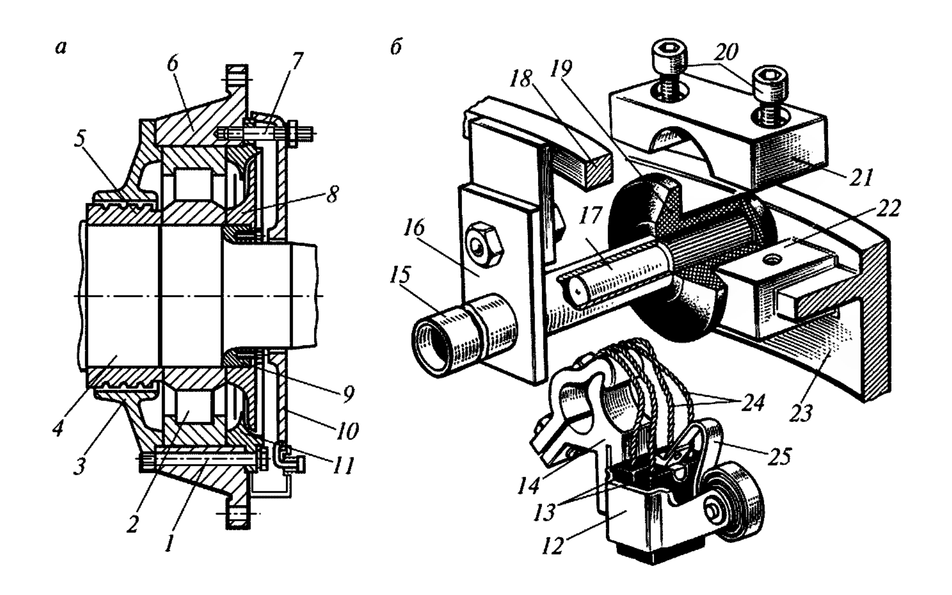


Рис. 2.49. Коллектор генератора:
1, *20* — болты; *2* — роликовый подшипник; *3*, *11* — задняя и передняя крышки; *4* — вал; *5* — лабиринтное кольцо; *6* — подшипниковый щит; *7* — шпилька; *8* — маслоотражательный диск; *9* — кольцо; *10* — маслотстойник; *12* — щеткодержатель; *13* — щетка; *14* — зажим; *15* — трубка; *16* — контактная пластина; *17* — палец; *18* — сборная шина; *19* — изолятор; *21* — накладка; *22* — гнездо траверсы; *23* — траверса; *24* — шунт; *25* — пластинчатая пружина

яна медная контактная пластина *16*, соединенная с одной из сборных шин *18*. К шинам припаяны медные пластины с отверстиями для болтов крепления кабелей силовой цепи.

Охлаждающий воздух засасывается вентиляторным колесом *6* со стороны коллектора через окна между выступами подшипникового щита и выбрасывается в пространство между кронштейнами *25*. Внутри генератора воздух расходится двумя параллельными потоками, один из потоков проходит между якорем и полюсами, а другой — по вентиляционным каналам внутри якоря и коллектора. Над вращающимся вентиляторным колесом установлена защитная сетка из проволоки, приваренная к кронштейнам *25*.

Тяговый генератор **ГП-300Б** (рис. 2.50) применяется на тепловозах ТЭМ-2 и состоит из тех же частей, что и генератор ГП-311Б.

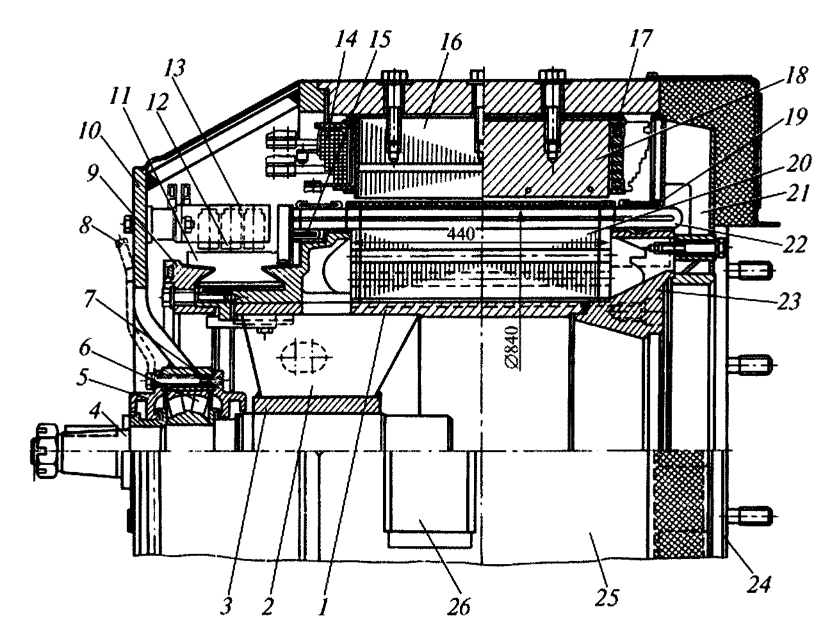


Рис. 2.50. Тяговый генератор ГП-300Б:
1 — барабан корпуса якоря; *2* — ребра; *3* — ступица корпуса якоря; *4* — вал; *5*, *7* — переднее и заднее лабиринтные уплотнения; *6* — подшипник; *8* — трубка для смазывания; *9* — нажимная шайба; *10* — подшипниковый щит; *11* — коллектор; *12* — щетки; *13* — щеткодержатель; *14*, *16* — обмотка и сердечник главного полюса; *15* — уравнительные соединения; *17*, *18* — обмотка и сердечник добавочного полюса; *19* — бандаж; *20*, *22* — обмотка и сердечник якоря; *21* — вентилятор; *23* — фланец; *24* — центрирующий бурт; *25* — станина; *26* — опорные лапы

Станина *25* генератора цилиндрической формы изготовлена из толстолистовой стали Ст3; одним концом с центрирующим буртом *24* она прикреплена к большому фланцу картера дизеля. Генератор опирается на поддизельную раму лапами *26*, приваренными к станине.

Машина выполнена с самовентиляцией: встроенное вентиляторное колесо закреплено на корпусе якоря. Воздух для охлаждения генератора засасывается вентилятором *21* из капота через отверстия в подшипниковом щите. Со стороны дизеля станина имеет закрытое сетками отверстие для выхода охлаждающего воздуха.

Катушки *главного полюса* имеют независимую и пусковую обмотки, причем независимая обмотка намотана поверх пусковой.

Обмотка якоря простая петлевая с уравнительными соединениями. Проводники секций якоря покрыты стеклянной и миканитовой изоляцией, а затем вставлены в миканитовую гильзу. Сверху намотаны слои стеклянной и миткалевой лент. Между секциями на дно паза и под крепящие обмотку клинья положены миканитовые прокладки. Под передними лобовыми частями обмотки якоря в углублениях передней нажимной шайбы расположены уравнительные соединения, выполненные из неизолированной меди.

2.7.2. Тяговые электродвигатели

Тяговый электродвигатель **ЭД-118Б** (рис. 2.51) предназначен для привода колесных пар тепловоза через одноступенчатый прямозубый редуктор.

Техническая характеристика тягового электродвигателя ЭД118Б

Мощность, кВт	305
Ток длительный номинальный, А	720
Напряжение длительного режима, В	463
Ток максимальный, А	1100
Напряжение максимальное, В	700
Частота вращения номинальная, об/мин	585
Частота вращения максимальная, об/мин	2290
Расход охлаждающего воздуха, $м^3$/мин	75
КПД, %	91,5
Масса, кг	3350

Частота вращения регулируется изменением напряжения тягового генератора в диапазоне от 300 до 700 В, а также ослаблением возбуждения. Реверсирование осуществляется переключением полярности включения обмотки возбуждения.

Магнитная система состоит из литого восьмигранного остова *14* с установленными на нем четырех главных *16* и четырех добавочных *12* полюсов. Магнитный поток, созданный главными полюсами, замыкается по магнитной цепи, состоящей из сердечников главных полюсов, воздушных зазоров между главными полюсами и якорем, зубцового слоя якоря, спинки якоря и остова.

Главные полюсы закреплены на остове болтами и состоят из сердечника и катушки. Сердечник набран из отдельных листов низкоуглеродистой стали, скрепленных заклепками. Катушка полюса выполнена медным проводом с изоляцией класса F. Сердечник в

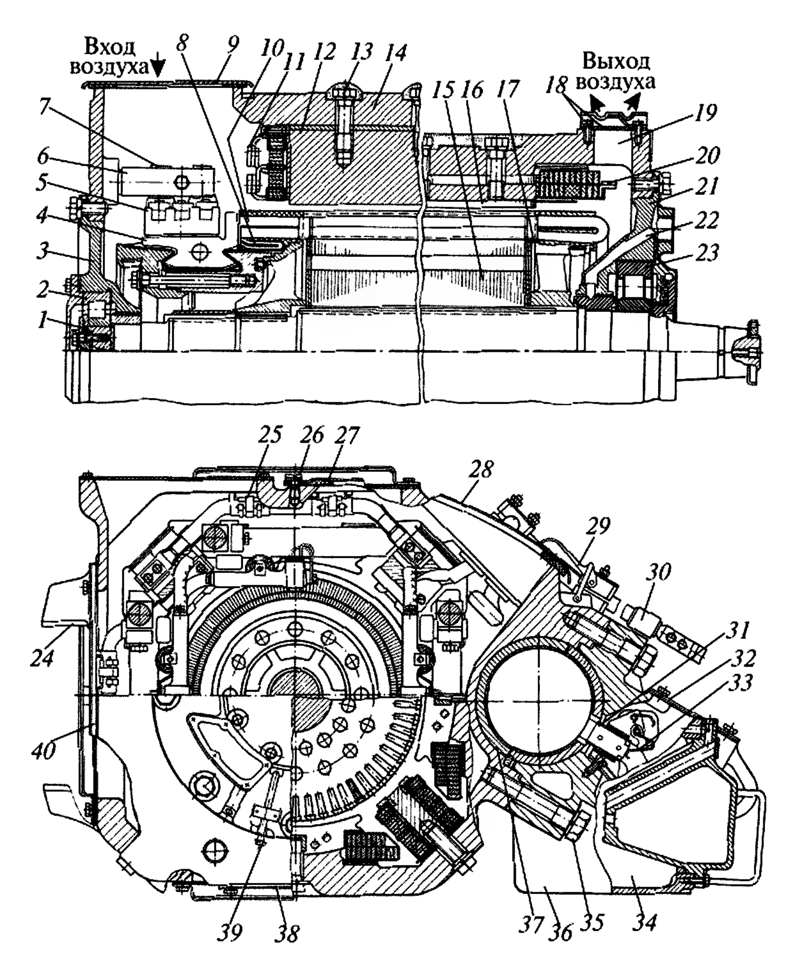


Рис. 2.51. Тяговый электродвигатель ЭД-118Б:

1 — вал; *2*, *23* — роликовые подшипники; *3*, *21* — подшипниковые щиты; *4* — коллектор; *5* — щеткодержатель; *6* — кронштейн; 7 — изолятор; *8* — уравнительные соединения; *9* — крышка (закрыта в нерабочем состоянии); *10*, *15* — обмотка и сердечник якоря; *11*, *20* — межкатушечные соединения; *12* — добавочный полюс; *13* — болт, залитый компаундом; *14* — корпус (остов); *16* — главный полюс; *17* — сварные пакеты; *18* — щитки; *19* — отверстие для выхода воздуха; *22* — атмосферный канал; 24 — сменные накладки выступов (носиков); *25* — крепление межкатушечного соединения к остову; *26* — бобышка; 27 — уплотнение; *28* — верхняя крышка; *29* — замок; *30* — выводной провод; *31* — фитиль; *32*, *38*, *40* — крышки; *33* — нажимное устройство; *34* — ванна; *35* — болт; *36*, *37* — «шапка» и вкладыш моторно-осевого подшипника; *39* — трубка подачи масла

сборе с катушкой пропитывают эпоксидным компаундом под избыточным давлением. После пропитки сердечник с катушкой представляют собой неразъемную конструкцию, устойчивую к вибрациям и температурным воздействиям.

Выводы катушек главных полюсов припаяны к виткам серебросодержащим припоем. С помощью болтового крепления катушки главных полюсов соединены с шинами. Гибкие шины дополнительно крепят к остову через резиновые втулки, расположенные между шинами и остовом.

Сердечники *добавочных полюсов* выполняют из сплошного проката с низким содержанием углерода. Изоляция катушек добавочных полюсов — класса F, выводы катушек выполнены из шинной меди размером 6×30 мм.

Якорь состоит из вала *1*, на который напрессован сердечник *15*, выполненный из отдельных листов электротехнической стали. Сердечник якоря удерживается с обеих сторон нажимными шайбами: передней, расположенной со стороны коллектора, и задней — с противоположной стороны. В сердечнике выполнены прямоугольные пазы для размещения обмотки якоря *10*, а также аксиальные отверстия для вентиляции. На вал якоря также напрессован *коллектор*, пластины которого выполнены из коллекторной меди с присадкой легирующих металлов. К «петушкам» коллектора припаивают проводники обмотки якоря и уравнительные соединения. Для уменьшения массы коллекторных пластин в их середине сделаны отверстия. Коллекторные пластины изолированы друг от друга миканитовыми прокладками толщиной 1,2 мм, а от корпуса — миканитовыми манжетами. С целью исключения возможности проникновения влаги во внутреннюю полость готового коллектора ее проверяют на плотность газами.

Конец вала *1*, противоположный стороне коллектора, обработан на конус и предназначен для горячей посадки на него в готовом электродвигателе ведущей шестерни тягового редуктора. До укладки обмотки в пазы сердечника якорь балансируют статически.

Обмотка якоря простая петлевая, состоит из отдельных катушек, уложенных в пазы якоря и закрепленных стеклотекстолитовыми клиньями. Лобовые части обмотки якоря уложены на цилиндрической поверхности нажимных шайб и закреплены стеклобандажами.

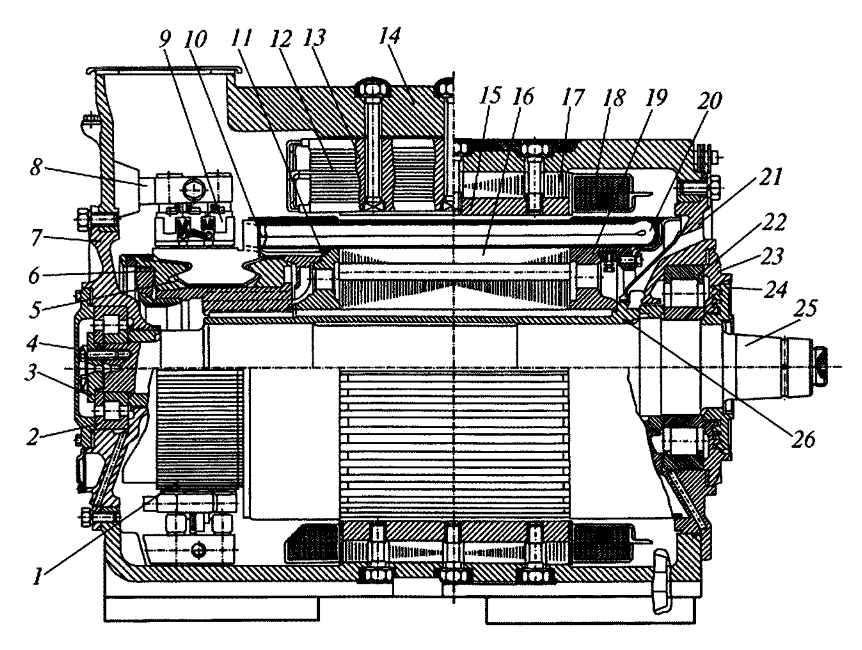


Рис. 2.52. Тяговый электродвигатель ЭДУ-133:
1 — коллектор; *2, 22* — подшипники; *3* — упорное кольцо; *4, 23* — крышки подшипников; *5* — изоляционный цилиндр; *6* — нажимной конус; *7, 21* — малый и большой подшипниковые щиты; *8* — изолятор; *9* — щеткодержатель; *10* — нажимная втулка; *11, 19* — передняя и задняя нажимные шайбы; *12, 13* — обмотка и сердечник добавочного полюса; *14* — станина; *15* — планка; *16* — сердечник якоря; *17, 18* — сердечник и обмотка возбуждения главного полюса; *20* — обмотка якоря; *24* — лабиринтное кольцо; *25* — вал; *26* — переходная втулка

Конструкция тягового электродвигателя **ЭДУ-133** (рис. 2.52) обеспечивает взаимозаменяемость с тяговыми электродвигателями типа ЭД-107А, ЭД-118(А, Б), ЭД-120А, ЭД-121А и ЭД-123 на эксплуатируемых тепловозах без изменения параметров электрической схемы.

Технические характеристики тягового электродвигателя ЭДУ-133 представлены в табл. 2.2.

Магнитная система состоит из литого восьмигранного остова (станины) *14* с установленными на нем четырьмя главными *17* и четырьмя добавочными полюсами *13*. Остов отливают из мягкой литой стали Ст25ЛК20 или выполняют сварным из низкоуглеродистой стали 09Г2С. С торцов остов закрыт подшипниковыми щитами

7 и *21*. На корпусе имеются приливы с резьбой для крепления кожуха зубчатой передачи. В верхней части корпуса со стороны коллектора имеется вентиляционное отверстие, соединенное брезентовым рукавом с каналом, через который нагнетается воздух для охлаждения электродвигателя. С противоположной стороны корпуса расположены три отверстия, защищенные сеткой и щитками для выхода вентилируемого воздуха.

Таблица 2.2

Технические характеристнки тягового электродвнгателя ЭДУ-133

Параметр	Режимы работы	
	часовой	продолжительный
Мощность, кВт	414	
Напряжение на коллекторе, В	810	
Ток якоря, А	890	577
Частота вращения якоря наибольшая, об/мин	2320	
Расход вентилируемого воздуха, $м^3$/мин, не менее	54	
КПД, %	92,0	94,5
Степень возбуждения, %	100	
Класс изоляции всех обмоток	F	
Сопротивление обмоток постоянному току при температуре 20 °С, Ом:		
якоря	0,033	
главных полюсов (без шунта)	0,018	
компенсационной и добавочных полюсов	0,0285	
Испытательное напряжение изоляции относительно корпуса, В	4000	
Масса, кг	2950	

При опорно-осевом подвешивании с циркуляционной и польстерной системами смазки тяговый электродвигатель оборудован моторно-осевыми подшипниками скольжения (ЭДУ-133П) с вкладышами из бронзы. Вместо подшипников скольжения могут быть поставлены моторно-осевые подшипники качения (ЭДУ-133Ц). При опорно-рамном подвешивании (ЭДУ-133Р) моторно-осевые подшипники отсутствуют.

В электродвигателе имеются пять выводных концов: начало и конец обмотки возбуждения D1 и D2; начало и конец якорной

цепи A1, B2; промежуточный вывод якорной цепи A3. Кабельные выводы крепятся к остову зажимами (клицами) из древесно-слоистого пластика.

Вал *якоря* опирается на два роликовых подшипника, помещенных в подшипниковые щиты. Со стороны коллектора установлен малый подшипниковый щит *7*, со стороны шестерни — большой подшипниковый щит *21*. С внутренней стороны каждого подшипникового щита расположены лабиринтные кольца. К торцу вала якоря болтами и шайбой прикреплено упорное кольцо *3*. Продольный разбег якоря составляет 0,08—0,5 мм.

Подшипниковые щиты плотно подогнаны к остову и прикреплены к нему болтами, под головки которых подложены пружинные шайбы, предохраняющие болты от самоотвинчивания. Кроме того, в подшипниковых щитах имеются резьбовые отверстия для отжимных болтов.

Остов тяговых электродвигателей всех модификаций имеет четыре кронштейна щеткодержателей. Допуск на отклонение расположения кронштейнов не должен превышать ±0,5 мм.

Корпус *щеткодержателей* выполнен из латуни и укреплен на кронштейне, вваренном в торцевую часть стенки остова. Для крепления щеткодержателей в корпус запрессованы два «пальца», которые изолированы от корпуса прессматериалом АГ-4С или твердым изоляционным слоем из эпоксидного компаунда с надетым на него изолятором из прессматериала К-78-51. Такое выполнение «пальцев» щеткодержателей дает возможность повысить их изоляционные свойства и тем самым избежать снижения сопротивления изоляции в эксплуатации, которое наблюдалось при использовании фарфоровых изоляторов. В корпусе щеткодержателей находятся два гнезда для щеток: в одно из них вставлена одна пара щеток, в другое — две пары. Нажатие на щетки осуществляется спиральными пружинами.

Главные полюсы состоят из сердечника и катушки. Сердечник набран из отдельных пластин малоуглеродистой стали Ст2 толщиной 2 мм. Листы сердечника спрессованы и закреплены четырьмя заклепками с потайными головками. Крайние листы выполнены большей толщины, что предотвращает распушение листов сердечника и позволяет разместить головки потайных заклепок. В середине сердечника выштамповано отверстие, в которое запрессовы-

вают стержень с резьбовыми отверстиями, предназначенными для ввинчивания болтов, крепящих сердечник к остову. Головки болтов заливают кварц-компаундом, который препятствует попаданию влаги внутрь остова. *Катушка* главного полюса намотана из шинной меди на широкое ребро (плашмя) в два слоя. Витки изолированы друг от друга непропитанной стеклослюдинитовой лентой и пропитанной стеклотканью. Снаружи изоляция катушек имеет четыре слоя стеклослюдинитовой ленты. В местах соприкосновения катушки с остовом дополнительно устанавливают прокладки из стеклоткани и стеклотекстолита. Между слоями катушки также укладывают прокладки из стеклотекстолита. Каждый слой изоляции промазан компаундом. Катушку с изоляцией запекают и спрессовывают, затем покрывают эмалью.

Сердечники *добавочных полюсов* изготовлены сплошными из толстолистовой стали Ст3. Наконечник добавочного полюса выполнен меньшего размера, поэтому для удержания катушки с двух сторон полюсного наконечника приклепаны латунные или дюралюминиевые угольники.

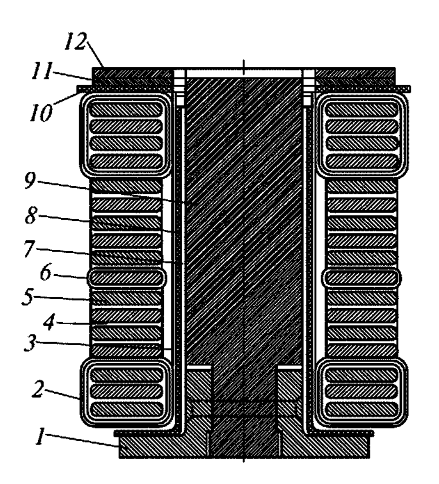


Рис. 2.53. Разрез добавочного полюса тягового электродвигателя ЭДУ-133: *1* — полюсный наконечник; *2* — корпусная изоляция; *3*, *4*, *8*, *10* — изоляционные прокладки; *5* — провод катушки; *6* — защитная стеклолента; *7* — каркас; *9* — сердечник полюса; *11*, *12* — металлические диамагнитные прокладки

Для предотвращения перемещения катушки вдоль сердечника (при усыхании изоляции) между ней и остовом установлена пружинная рамка. Для уменьшения магнитного насыщения сердечника добавочного полюса и станиной установлены диамагнитные прокладки *12* (рис. 2.53). Катушка *5* добавочного полюса выполнена из шинной меди, намотанной на узкое ребро. Между витками катушки установлены прокладки *4* из пропитанной стеклослюдинитовой ткани. Класс нагревостойкости изоляции F. Катушка надета на стальной каркас *7*. Для изоляции от корпуса ее вместе с кар-

касом пропитывают в компаунде и затем покрывают электроизоляционной эмалью.

Якорь электродвигателя состоит из вала, сердечника с обмоткой, передней и задней нажимных шайб, коллектора и переходной втулки. Вал *25* (см. рис. 2.52) изготовлен из прокатной стали 30ХМА с термообработкой. Один конец вала обработан на конус 1:10 для напрессовки шестерни. Для уменьшения концентрации напряжений переходы с одного диаметра вала на другой выполнены с галтелями.

На вал напрессована переходная втулка *26*, на которую напрессован сердечник якоря *16*, выполненный из отдельных листов электротехнической стали марки 2211, 2212, толщиной 0,5 мм. Листы изолированы с обеих сторон тонким слоем лака. В сердечнике выштампованы пазы, куда уложена обмотка якоря, а также расположены 32 вентиляционные отверстия диаметром 27 мм в два ряда. Сердечник удерживается с обеих сторон нажимными шайбами: передней *11*, расположенной со стороны коллектора и задней *19* — с противоположной стороны. Нажимные шайбы, одновременно являющиеся обмоткодержателями, отлиты из стали. Их перед укладкой обмотки якоря покрывают стеклотканью, пропитанной в эпоксидном лаке, опрессовывают и запекают, благодаря чему создается монолитная конструкция.

Обмотка якоря — простая петлевая, уложена в пазы и закреплена текстолитовыми клиньями толщиной 6 мм. Лобовые части обмотки закреплены стеклобандажами с классом нагревостойкости Н. В пазовой части катушка изолирована тремя слоями стеклослюдинитовой ленты ЛС-ЭП толщиной 0,1 мм в полуперекрышу и одним слоем *6* (см. рис. 2.53) стеклоленты ЛЭС толщиной 0,1 мм также в полуперекрышу. Каждый проводник *5* покрывается изоляцией *4* одним слоем стеклоленты толщиной 0,1 мм. В задних лобовых частях дополнительно между секциями устанавливают прокладки из стеклоленты. Между витками передних лобовых частей устанавливают прокладки из слюды, предотвращающие витковые замыкания при осадке и бандажировке обмотки. Уравнительные соединения расположены на передней нажимной шайбе под лобовыми частями обмотки якоря.

Коллектор состоит из пластин, нажимных втулок *10* (см. рис. 2.52), конусов *6*, двух изоляционных манжет и изоляционного цилиндра *5*. Пластины коллектора изготовлены из твердотянутой меди. Для

повышения износостойкости их легируют кадмием или серебром и изолируют друг от друга коллекторным миканитовым КФШ. От корпуса пластины изолированы миканитовым цилиндром и манжетами ФФГА толщиной 2 мм. На выступающий конец миканитовой манжеты наложен бандаж из стеклоленты, покрытой эмалью.

Вентиляция электродвигателя — независимая. Охлаждающий воздух нагнетается вентиляторами, установленными в кузове тепловоза. Воздух от вентилятора поступает через раструб, расположенный над коллектором, а затем разветвляется на два параллельных потока, подобных тому, как это выполнено в тяговых генераторах.

Тяговый электродвигатель **ТЕ-006** (рис. 2.54) тепловоза ЧМЭ-3 состоит из следующих основных частей: остова *9*, переднего и заднего подшипниковых щитов *4* и *15*, главных полюсов *12*, добавочных полюсов *25*, якоря *11*, коллектора *6*, щеткодержателей *27* со щетками.

Восьмигранный *остов 9* является частью магнитной цепи машины, поэтому отлит из стали с хорошей магнитной проводимостью. С одной стороны остова расположены приливы под вкладыши моторно-осевых подшипников, а с другой стороны — два выступа (носика) *28* для монтажа пружинной подвески, с помощью которой тяговый электродвигатель опирается на раму тележки. С торцов остов закрыт передним и задним подшипниковыми щитами. Со стороны коллектора в остове выполнены три люка для осмотра и обслуживания коллекторно-щеточного узла и раструб для подачи охлаждающего воздуха. Смотровые люки закрыты съемными крышками с уплотнительными прокладками. Крышка *22* верхнего люка закреплена пружинным замком, а крышки *26* и *24* бокового и нижнего люков — четырьмя болтами. Со стороны шестерни в торце остова имеются четыре окна для выхода охлаждающего воздуха.

К внутренней части остова болтами прикреплены четыре главных *12* и четыре добавочных *25* полюса.

Для герметизации остова головки болтов залиты компаундной массой. Сердечник *главного полюса* набран из отдельных листов электротехнической стали толщиной 1 мм, изолированных друг от друга лаком. Листы спрессованы и стянуты четырьмя заклепками диаметром 16 мм, концы которых приварены к стальным пластинам толщиной 15 мм, расположенных по концам пакета. В сер-

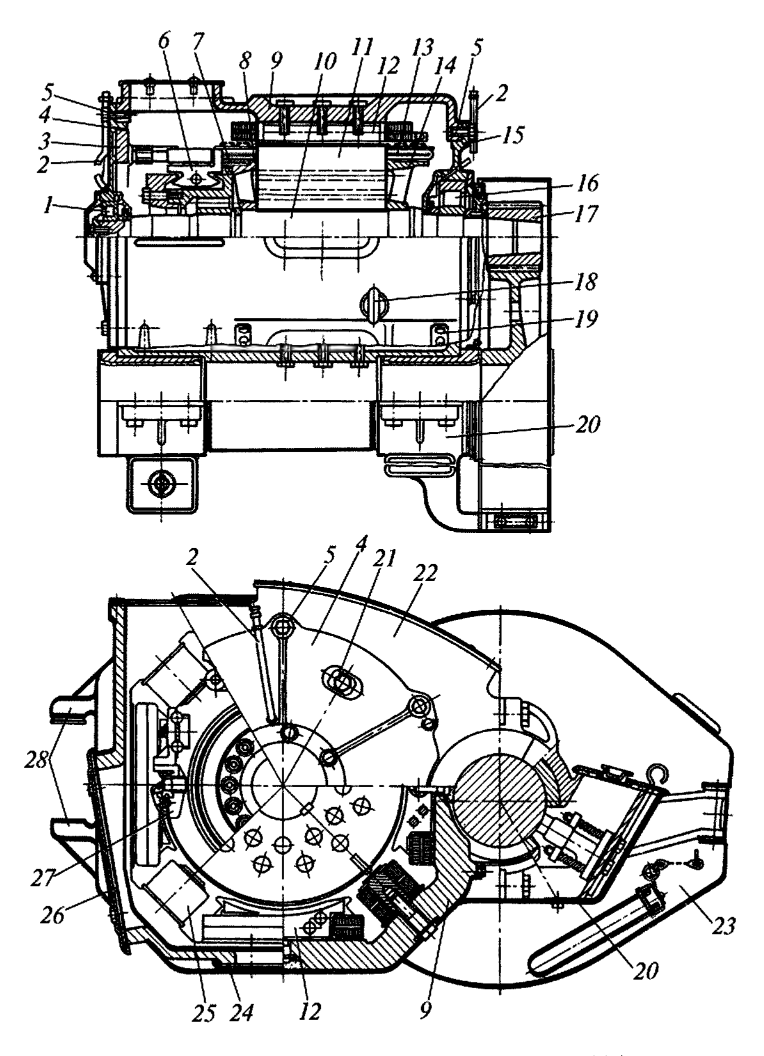


Рис. 2.54. Тяговый электродвигатель ТЕ-006:
1, *16* — роликовые подшипники; *2* — трубка подвода смазки; *3* — траверса; *4*, *15* — передний и задний подшипниковые щиты; *5*, *21* — болты; *6* — коллектор; *7* — уравнительные соединения; *8*, *14* — передняя и задняя нажимные шайбы; *9* — остов; *10* — вал якоря; *11* — сердечник якоря; *12* — главный полюс; *13* — обмотка якоря; *17* — ведущая шестерня; *18* — рым-болт; *19* — накладка; *20* — шапка моторно-осевого подшипника; *22*, *24*, *26* — крышки; *23* — кожух тягового редуктора; *25* — добавочный полюс; *27* — щеткодержатель; *28* — выступ (носик)

дечнике выштамповано отверстие диаметром 42 мм, куда запрессован цилиндрический стержень с тремя резьбовыми отверстиями под крепежные болты.

Катушка главного полюса выполнена из полосовой меди и содержит 18 витков.

Сердечник *добавочного полюса* изготовлен из стального проката и заострен со стороны якоря. С противоположной стороны сердечника выполнены три резьбовых отверстия под крепежные болты. Снизу к сердечнику приварен угольник, являющийся упором для катушки, намотанной из 12 витков полосовой меди.

Якорь состоит из вала *10,* сердечника *11,* обмотки якоря *13,* коллектора *6.* Вал изготовлен из легированной стали, на конусную часть вала напрессована шестерня *17.* Сердечник якоря *11* собран из листов электротехнической стали, напрессован на вал и зафиксирован шпонкой. По торцам сердечника расположены передняя *8* и задняя *14* нажимные шайбы. Шайба *14* упирается в борт вала, а шайба *8* дополнительно застопорена кольцом. В сердечнике якоря выштампованы вентиляционные отверстия, расположенные по двум окружностям, на наружной поверхности сделаны пазы для укладки простой петлевой обмотки якоря. Каждая катушка якоря представляет собой три одновитковые секции. Активные стороны секций укреплены в пазах якоря текстолитовыми клиньями, а передние и задние лобовые части катушек закреплены проволочными бандажами. Под передними лобовыми частями обмотки якоря расположены уравнительные соединения *7.*

Коллектор 6 собран из медных пластин, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками. Нижняя часть коллектора имеет форму «ласточкина хвоста», благодаря чему пластины закрепляются стальными клиньями и болтами. От стальных клиньев коллекторные пластины изолированы миканитовым цилиндром и миканитовой манжетой.

Вал якоря опирается на два роликовых подшипника *1* и *16*, размещенных в подшипниковых щитах.

Корпус *щеткодержателя 1* (рис. 2.55) отлит из бронзы и имеет три гнезда, в каждое из которых вставлено по одной разрезной щетке *2.* Требуемое нажатие на щетку осуществляют спиральные пружины *3* с храповиками для регулирования нажатия. Для регулирования зазора между коллектором и щеткодержателем отвер-

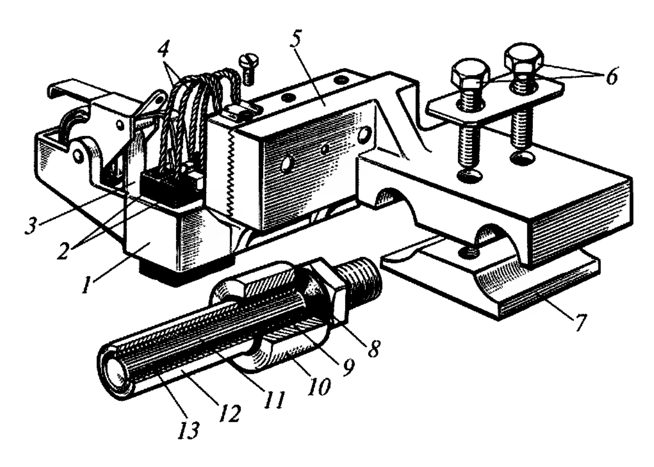


Рис. 2.55. Щеточный узел тягового электродвигателя:
1 — щеткодержатель; *2* — щетка; *3* — спиральная пружина; *4* — шунт; *5* — кронштейн; *6* — болты; *7* — накладка; *8* — резиновое кольцо; *9* — смолистая масса; *10* — фарфоровый изолятор; *11* — палец; *12* — стальная трубка; *13* — изоляция (лакоткань и прессшпан)

стия под болты, крепящие кронштейн к щеткодержателю, имеют овальную форму. Для более надежной фиксации привалочные поверхности корпуса и кронштейна выполнены зубчатыми. Кронштейн посредством накладки *7* и двух стяжных болтов *6* укреплен на двух пальцах *11*, ввернутых в траверсу. На рифленую поверхность пальца накладывают слой изоляции *13*, а затем на смолистой массе *9* укрепляют фарфоровый изолятор *10*, под который предварительно ставят резиновое кольцо *8*. На слой изоляции напрессовывают стальную трубку *12*.

Охлаждают тяговые электродвигатели два центробежных вентилятора с приводом от коленчатого вала дизеля через клиноременную передачу. Каждый вентилятор охлаждает три тяговых электродвигателя одной тележки.

2.8. Вспомогательные и специальные электрические машины тепловозов

Электрические машины, обслуживающие собственные нужды тепловозов, дизель-поездов и рельсовых автобусов, называют ***вспомогательными и специальными машинами***. Обычно момент сопро-

тивления на валу двигателя привода вспомогательных машин изменяется незначительно, поэтому частота их вращения изменяется также незначительно.

Вспомогательные электрические машины ТПС можно классифицировать по способам питания электрической энергией и охлаждения, по роду тока, по степени защиты, по климатическому исполнению и др.

По способу монтажа вспомогательные машины подразделяют на горизонтальные установки на опорных лапах или фланцевые, и на вертикальные установки, с креплением к основанию (фундаменту) жестко или посредством эластичных элементов амортизаторов.

Чаще всего вспомогательные машины размещают в кузове ТПС, где уровень вибрации ниже, чем на ТЭД, но и здесь вибрации достигают ускорений 10 м/с^2 в диапазоне частот 1—100 Гц. Хотя вспомогательные машины располагают в кузове, на них тоже воздействует пыль и влага. Работающее оборудование выделяет тепло, поэтому возможно превышение температуры воздуха в кузове над температурой окружающей среды на 15—20 °С. В этом случае температура воздуха в летнее время может достигать до +60 °С, зимой она может снижаться для зоны умеренного климата до –50 °С, а для зон холодного климата — даже до –60 °С, при этом относительная влажность воздуха при температуре +25 °С может повышаться до 98%. Как указывалось выше, вращающий момент асинхронного двигателя существенно зависит от напряжения на его зажимах.

Для питания цепей управления, освещения и зарядки аккумуляторных батареи применяются вспомогательные генераторы.

Как указывалось выше, тяговый генератор тепловоза имеет независимое возбуждение. Его независимая обмотка возбуждения получает питание от специального генератора небольшой мощности — возбудителя. Обычно возбудители и вспомогательные генераторы объединяют в один корпус, т.е. в двухмашинный агрегат, приводом которого является дизель тепловоза.

Двухмашинный агрегат **А-706Б** объединяет возбудитель В600 и вспомогательный генератор ВГТ 275/120 (рис. 2.56).

Корпуса машин — цилиндрической формы, жестко соединены между собой болтами *15*.

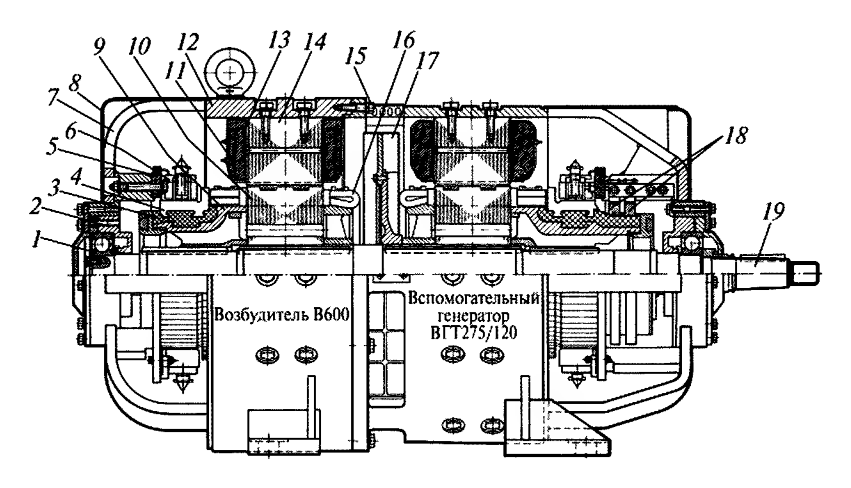


Рис. 2.56. Двухмашинный агрегат типа А706Б:
1 — подшипник; *2* — капсула; *3* — пластмассовое основание коллектора; *4* — коллектор; *5* — траверса; *6* — щеткодержатель; *7* — подшипниковый щит; *8* — крышка; *9* — втулка; *10* — сердечник якоря; *11* — размагничивающая катушка; *12* — корпус; *13* — катушка независимого возбуждения; *14* — сердечник главного полюса; *15* — болты, соединяющие корпуса машин; *16* — обмотка якоря; *17* — вентилятор; *18* — контактные кольца; *19* — вал

Торцевые части корпусов — сварные, образуют подшипниковые щиты.

Якори возбудителя и вспомогательного генератора собраны на общем валу *19*. Количество коллекторных пластин, пазов, размеры паза, длина сердечников, размеры обмоток обеих машин одинаковы.

Сердечники якорей собраны из отдельных пластин электротехнической стали. Коллекторы — арочного типа, опрессованы на пластмассовом основании, состоят из 130 пластин. Обмотки якорей обеих машин волновые. Лобовые части обмоток закреплены проволочными бандажами. Вал *19* якорей опирается на два подшипника, которые установлены в капсулы.

К корпусам вспомогательного генератора и возбудителя прикреплены посредством болтов сердечники *главных* и *добавочных полюсов*. Возбудитель имеет шесть главных и четыре добавочных, а вспомогательный генератор — шесть главных и пять добавочных полюсов.

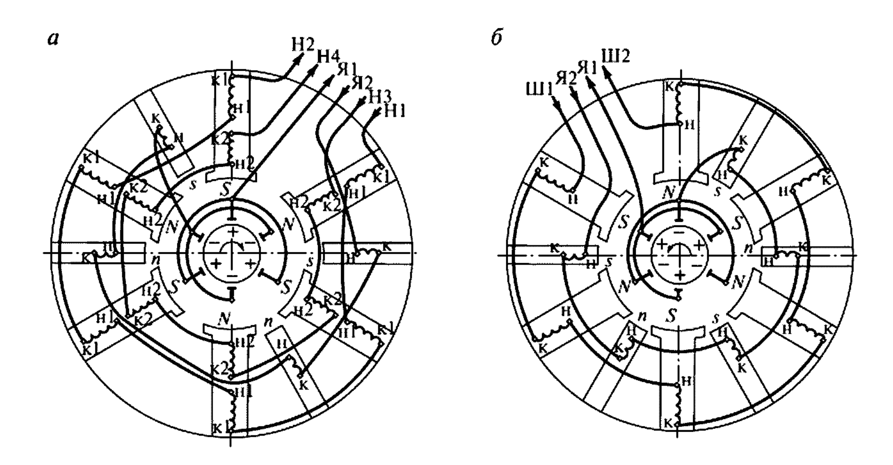


Рис. 2.57. Схема соединения обмоток машин агрегата А706А:
а — возбудитель В600; *б* — вспомогательный генератор ВГ 275/120; обозначение начала и конца катушек и обмоток: Н и К, Н1 и К1, Н2 и К2 — катушек полюсов; Н1 и Н2 — обмоток независимого возбуждения; Н3 и Н4 – размагничивающей; Ш1 и Ш2 — параллельного возбуждения; Я1 и Я2 — якоря

Начало и конец катушек добавочных полюсов возбудителя и вспомогательного генератора имеют обозначение Н и К. Катушки добавочных полюсов соединены последовательно между собой и последовательно с обмоткой якоря. Выводы обмотки якоря с обмотками добавочных полюсов как возбудителя, так и вспомогательного генератора обозначены Я1 и Я2 (рис. 2.57). Катушки главных полюсов возбудителя имеют по две обмотки возбуждения: независимую (выводы которой обозначены Н1 и Н2) и размагничивающую (выводы которой обозначены Н3 и Н4). Таким образом, возбудитель имеет шесть выводов, а вспомогательный генератор — четыре.

Щеткодержатели прикреплены к пластмассовой траверсе. Вентиляторное колесо *17* расположено в средней части агрегата.

Двухмашинный агрегат тепловозов ТЭМ2, ТЭМ3 состоит из возбудителя МВТ 25/9 и вспомогательного генератора МВТ 25/11. Конструктивной особенностью возбудителя МВТ 25/9 (рис. 2.58) являются расщепленные полюсы, которые имеют две независимые магнитные системы: насыщенную и ненасыщенную. Благодаря этому можно получить гиперболическую внешнюю характеристику.

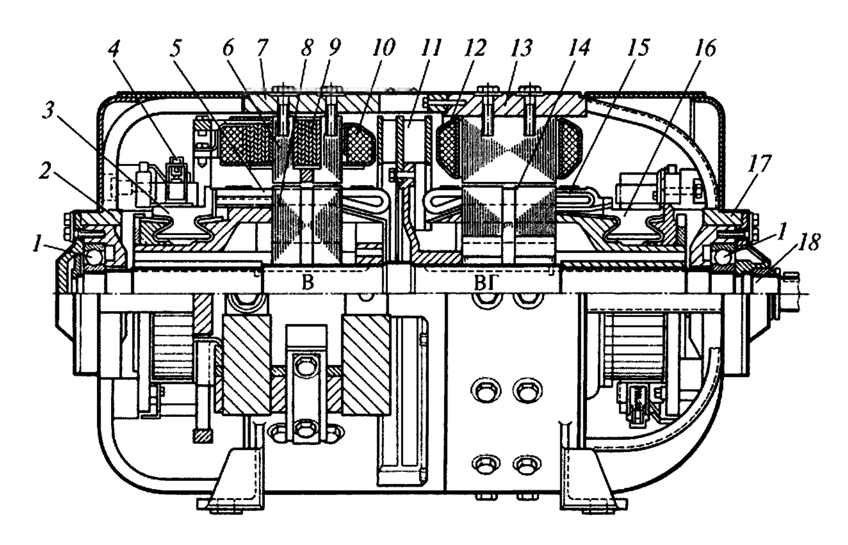


Рис. 2.58. Двухмашинный агрегат с возбудителем типа МВТ 25/9 и вспомогательным генератором типа МВТ 25/11:
1 — шарикоподшипники; *2*, *17* — подшипниковые щиты; *3*, *16* — коллекторы; *4* — щеткодержатель; *5*, *15* — обмотки якорей; *6* — сердечник якоря; *7*, *13* — станины возбудителя и генератора; *8*, *14* — якоря; *9* — дифференциальная обмотка; *10* — независимая обмотка; *11* — вентилятор; *12* — главный полюс; *18* — вал

В передачах мощности постоянного тока используют два типа возбудителей: с продольным (аксиальным) и поперечным (радиальным) расщеплением полюсов. Возбудитель МВТ 25/9 с продольным расщеплением имеет четыре главных полюса, сердечники которых разделены вдоль оси на две неравные части (рис. 2.59). Насыщенная часть имеет меньшие размеры и магнитные мостики в виде вырезов на сердечнике и стальных пластин между сердечником и корпусом. На каждом главном полюсе возбудителя расположены две обмотки: одна охватывает обе части сердечника и питается от вспомогательного генератора и якоря самого возбудителя, а другая — дифференциальная, намотана на насыщенную часть сердечника. Независимая обмотка имеет 242 витка из изолированного медного провода, дифференциальная — семь витков. В собранном виде катушки обмоток компаундированы и покрыты серой эмалью.

Сердечник якоря возбудителя набран из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Обмотка якоря возбудителя — про-

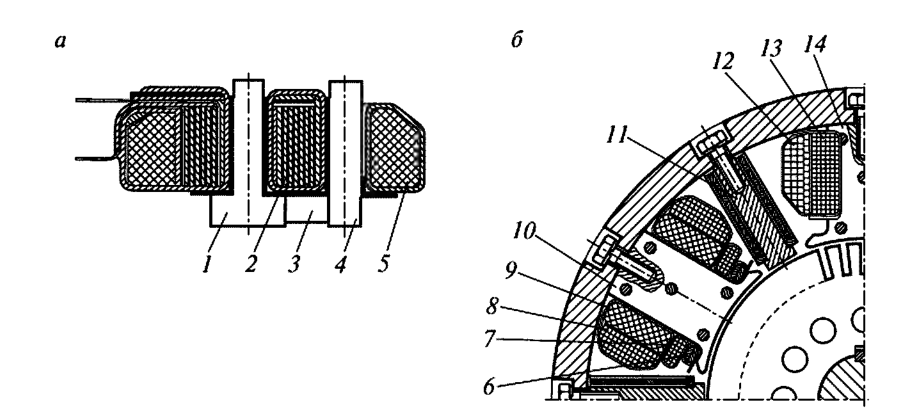


Рис. 2.59. Расщепленные полюсы:
а — возбудителя МВТ 25/9; *б* — возбудителя ВТ 275/120; *1*, *4* — сердечники полюса; *2*, *12* — дифференциальные обмотки; *3* — латунная проставка; *5*, *9* — обмотки независимого возбуждения; *6*, *7*, *8* — последовательная, ограничительная и регулировочная обмотки; *10* — сердечник ненасыщенного полюса; *11*, *13* — параллельная обмотка; *14* — сердечник насыщенного полюса

стая волновая, одновитковая и выполнена проводом прямоугольного сечения. Каждая секция состоит из трех проводников. В пазах обмотка удерживается гетинаксовыми клиньями, а ее лобовые части фиксируются проволочными бандажами.

Вспомогательный генератор МВТ 25/11 имеет шесть главных и шесть добавочных полюсов. Обмотка якоря — простая волновая, двухвитковая и выполнена проводом прямоугольного сечения. Возбуждение — параллельное.

Двухмашинный агрегат тепловоза ЧМЭ3 (рис. 2.60), так же как и тепловозов ТЭ10, 2М62, ТЭМ2 и др., представляет собой механическое объединение двух электрических машин: возбудителя и вспомогательного генератора.

Станины обеих машин выполнены в виде стальных цилиндров, к которым приварены опорные лапы *18*, крепящие двухмашинный агрегат на главной раме тепловоза. Болты *15* соединяют обе станины между собой. К станинам прикреплены по четыре главных и четыре добавочных полюсов.

Сердечники *главных полюсов* набраны из отдельных листов электротехнической стали толщиной 1 мм, изолированных друг от друга лаком. По концам пакета поставлены стальные листы толщи-

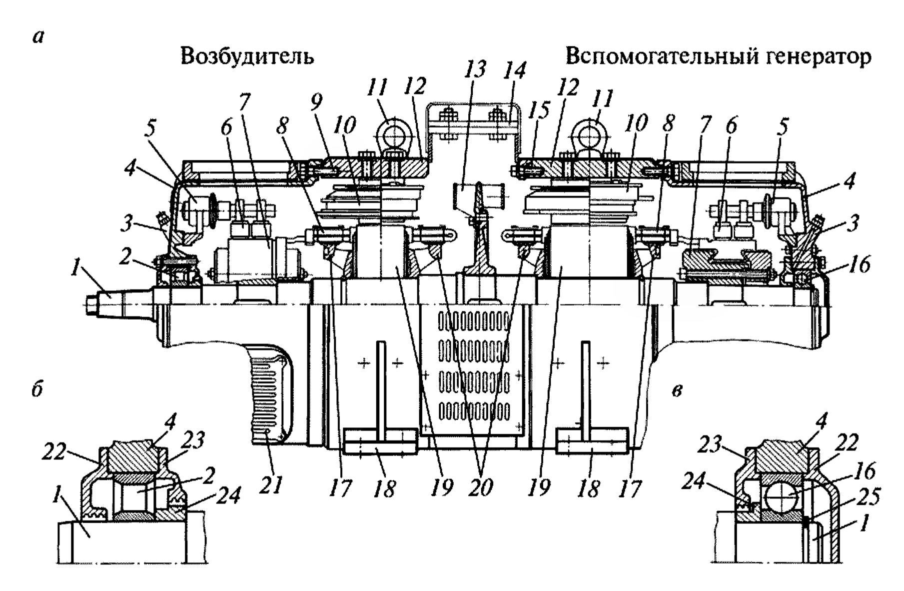


Рис. 2.60. Двухмашинный агрегат тепловоза ЧМЭ3:
а — продольный разрез; *б*, *в* — подшипниковые узлы; *1* — вал агрегата; *2* — роликовый подшипник; *3* — масленка; *4* — подшипниковый щит; *5* — траверса; *6* — щеткодержатель; *7* — коллектор; *8* — обмотка якоря; *9*, *15* — болты; *10* — главный полюс; *11* — рым-болт; *12* — станина; *13* — вентиляторное колесо; *14* — панель зажимов; *16* — шариковый подшипник; *17*, *20* — передняя и задняя нажимные шайбы; *18* — опорная лапа; *19* — сердечник якоря; *21* — нижняя крышка; *22*, *23* — передняя и задняя крышки; *24* — упорное кольцо; *25* — стопорное кольцо

ной 5 мм. Каждый пакет спрессован и стянут пятью заклепками. В пакете сделаны два резьбовых отверстия под крепежные болты.

Обмотка возбуждения вспомогательного генератора включена параллельно обмотке якоря.

На главных полюсах возбудителя расположены три обмотки возбуждения: независимая, параллельная и противокомпаудная, отделенные друг от друга гетинаксовыми прокладками толщиной 3 мм.

Добавочные полюсы обеих машин конструктивно одинаковы и отличаются лишь по способу крепления катушек. Сердечники выполнены цельными и имеют по два резьбовых отверстия под крепежные болты.

Якори обеих машин собраны на общем валу *1* и конструктивно почти одинаковы. Их сердечники собраны из отдельных пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм и изолированы друг от друга лаком. Листы зафиксированы шпонками и стянуты двумя чугунными нажимными шайбами, напрессованными на вал. В сердечниках якоря выполнены вентиляционные каналы для прохода охлаждающего воздуха. На поверхности сердечников расположены пазы, в которые уложена простая волновая обмотка. Проводники в пазах закреплены текстолитовыми клиньями.

Коллекторные пластины выполнены из медных пластин, изолированы друг от друга миканитовыми прокладками, а от корпуса коллектора и от нажимной шайбы — миканитовым цилиндром и двумя миканитовыми манжетами.

Вал опирается на два подшипника, размещенных в двух чугунных подшипниковых щитах, одинаковых по конструкции. Для осмотра коллекторно-щеточного узла в щитах прорезаны четыре люка, закрываемые съемными крышками с пружинными замками. Нижние крышки имеют прорези для прохода охлаждающего воздуха. На среднюю часть вала напрессовано вентиляторное колесо *13*, отлитое из силумина.

Токосъемные устройства обеих машин практически одинаковы. На чугунной траверсе *5* укреплены четыре комплекта *щеткодержателей*. Комплект состоит из двух щеткодержателей *6*, в каждом из которых установлено по одной щетке. Щетки вспомогательного генератора и возбудителя отличаются по размеру и поэтому не взаимозаменяемы.

***Электродвигатель* МВХ** (рис. 2.61) предназначен для привода вентилятора холодильника вспомогательного контура тепловоза ЧМЭ3. Электродвигатель установлен вертикально в шахте холодильника тепловоза в вертикальном положении.

Электродвигатель состоит из станины *4*, якоря *15*, коллектора *18*, главных *14* и добавочных *16* полюсов, подшипниковых щитов *10*, *17*, вентилятора *12*.

Станина цилиндрической формы выполнена из стали. К ней прикреплены четыре главных и четыре добавочных полюса. В средней части станины двумя болтами М6 прикреплена коробка выводов *6*. В станине также предусмотрено резьбовое отверстие под рым-болт.

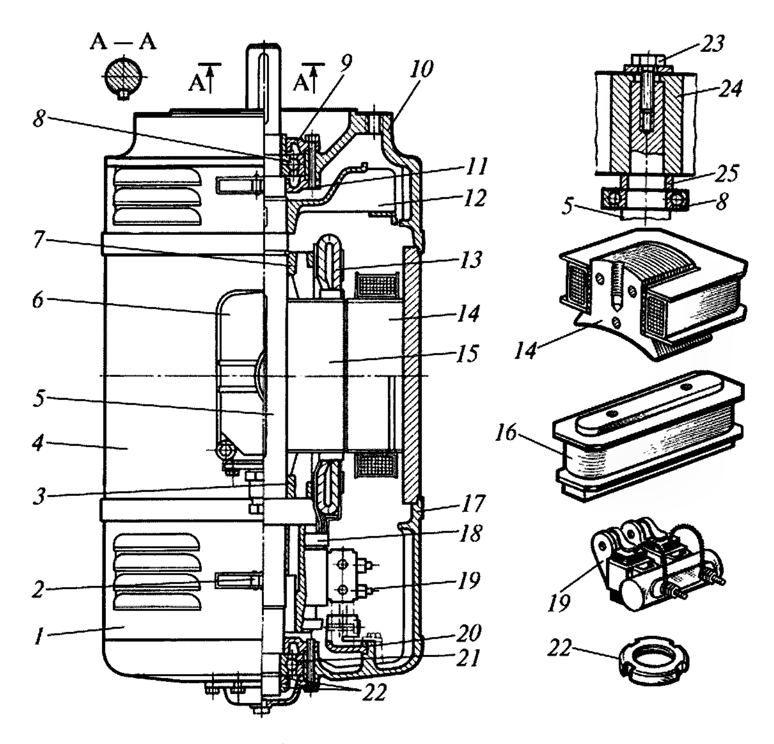


Рис. 2.61. Электродвигатель МВХ:
1 — съемная лента; *2* — замок; *3*, *7* — задняя и передняя нажимные шайбы; *4* — станина; *5* — вал якоря; *6* — коробка зажимов; *8*, *21* — шариковые подшипники; *9*, *11* — передняя и задняя крышки; *10*, *17* — подшипниковые щиты; *12* — вентиляторное колесо; *13* — обмотка якоря; *14* — главный полюс; *15* — сердечник якоря; *16* — добавочный полюс; *18* — коллектор; *19* — щеткодержатель; *20* — траверса; *22* — гайка; *23* — болт; *24* — ступица; *25* — втулка

Сердечник *главного полюса 14* выполнен из отдельных пластин электротехнической стали толщиной 1 мм, стянутых тремя заклепками. На сердечнике находится катушка возбуждения, намотанная из 28 витков медного изолированного провода и размещенная между двумя гетинаксовыми прокладками.

На цельный сердечник *добавочного полюса 16* надета катушка, намотанная из 38 витков медного изолированного провода. Катушка размещена между двумя изоляционными прокладками и упирается в угольник, приваренный к полюсному наконечнику.

Сердечник *якоря 15* закреплен на валу *5* шпонкой и выполнен из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, стянутых двумя отлитыми из чугуна нажимными шайбами. Задняя нажимная шайба *3* упирается в борт вала, а передняя шайба *7* после напрессовки дополнительно фиксируется стопорным кольцом, вставляемым в канавку, проточенную на валу. В сердечнике якоря сделаны пазы, куда уложена простая волновая обмотка. Активные стороны секций закреплены в пазу текстолитовыми клиньями. Лобовые части обмотки закреплены проволочными бандажами. Концы секций якорной обмотки припаяны к «петушкам» коллекторных пластин.

В подшипниковых щитах установлены шариковые подшипники *8* и *21*, на которые опирается вал якоря. Подшипниковые щиты отлиты из чугуна и прикреплены к станине болтами. В расточку нижнего подшипникового щита *17* запрессована траверса *20*, дополнительно укрепленая болтами. К траверсе прикреплены четыре комплекта щеткодержателей *19*. Комплект состоит из двух щеткодержателей, в каждом из которых находится по одной щетке.

Вентиляторное колесо *12* отлито из алюминиевого сплава и напрессовано на вал *5* со шпонкой до упора в борт, дополнительно закреплено стопорным кольцом.

Для входа и выхода охлаждающего воздуха в подшипниковых щитах сделаны прорези, причем воздух засасывается со стороны коллектора и выбрасывается с противоположной стороны.

Рабочее вентиляторное колесо осевого вентилятора холодильника напрессовано на выступающий конец вала якоря. Для предотвращения проворота колеса на валу на последнем установлена шпонка. Кроме того, ступица *24* сварного рабочего колеса дополнительно укреплена болтом *23*.

Стартер-генератор **ЧПСГ-У2** (рис. 2.62) — четырехполюсная машина постоянного тока, предназначенная для работы в двух режимах: стартерном и генераторном. В стартерном кратковременном режиме (продолжительность 6—8 с) стартер-генератор производит пуск дизеля, а в генераторном — питает цепи постоянного тока 110 В и подзарядки аккумуляторных батарей. В стартерном режиме возбуждение последовательное. На дизель-поезде ДР1П стартер-генератор используется для питания цепей постоянного тока напряжением 75 В.

Технические характеристики стартер-генератора ЧПСГ-У2

Режим прокрутки

Ток, А, не более 800
Момент, Н·м, не менее 860
Потребляемая мощность, кВт, не более 50
Частота вращения, об/мин 330

Режим трогания

Ток, А, не более 1600
Момент, Н·м, не менее 1520

Генераторный режим

Мощность, кВт 41
Напряжение на якоре, В 110
Частота вращения, об/мин .... 850—1500
Ток возбуждения во всем диапазоне скоростей, А .... 0,2±13 %

После пуска дизеля стартер-генератор продолжает работать в генераторном режиме.

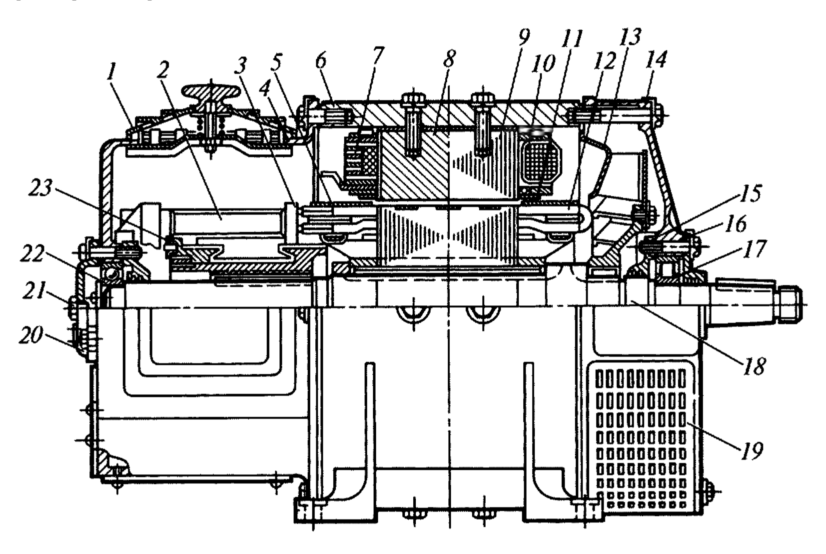


Рис. 2.62. Стартер-генератор ЧПСГ-У2:
1 — крышка люка; *2* — траверса щеткодержателя; *3* — «петушки» коллектора; *4*, *14* — подшипниковые щиты; *5* — бандаж якоря; *6* — станина; *7*, *8* — обмотка и сердечник добавочного полюса; *9* — сердечник главного полюса; *10*, *11*, *12* — параллельная, пусковая, якорная обмотки; *13* — вентиляторное колесо; *15*, *16* — лабиринтные крышки; *17* — роликоподшипник; *18* — вал якоря; *19* — вентиляционная крышка; *20* — крышка подшипника; *21* — пробка; *22* — шарикоподшипник; *23* — балансировочный груз

Исполнение стартер-генератора — горизонтальное, защищенное, с аксиальной вытяжной вентиляцией. Машина состоит из следующих основных узлов и деталей: станины, главных и добавочных полюсов с обмотками возбуждения, подшипниковых щитов, якоря с коллектором, траверсы со щеткодержателями и щетками.

Станина 6 имеет цилиндрическую форму, стальная, сварная. Подшипниковые щиты *4, 14* также стальные. Щит *4* со стороны коллектора имеет четыре окна: верхние боковые окна предназначены для осмотра и обслуживания коллекторно-щеточного узла и закрыты быстросъемными люковыми крышками *1*, а нижние — служат для прохода охлаждающего воздуха и защищены стальной сеткой. На торце щита установлена коробка выводов. В нижней части щита со стороны привода расположены два окна, защищенных сетками *19*, для выхода охлаждающего воздуха.

Сердечники *главных полюсов 9* выполнены из отдельных пластин электротехнической стали толщиной 1 мм и снабжены двумя обмотками возбуждения: параллельной *10* и пусковой *11*. Сердечники *добавочных полюсов 8* выполнены из стали Ст2. Обмотки как главных, так и добавочных полюсов выполнены из меди, изолированы, пропитаны в лаке и покрыты эмалями.

Якорь стартер-генератора состоит из пакета листов электротехнической стали, коллектора, обмотки якоря *12*, вентилятора *13* и вала *18* с насаженными на него подшипниками *17, 22*. Обмотка якоря простая волновая, уложена в открытых пазах отдельными изолированными катушками и закреплена в них и лобовых частях проволочными бандажами.

Коллектор состоит из медных пластин, легированных кадмием. Пластины изолированы друг от друга миканитовыми прокладками, а от корпуса — миканитовой манжетой и миканитовым цилиндром. Коллекторные пластины стянуты стальными конусами.

Вентиляция — аксиальная, вытяжная. Воздух входит в машину со стороны коллектора и выходит со стороны привода. На литой ступице, насаженной на вал *18* со стороны привода, закреплен центробежный вентилятор, состоящий из диска и воронки, соединенных радиально расположенными лопатками. Протекание воздуха в одном направлении обеспечивается при любом направлении вращения якоря.

Электростартер **ЭС-1** (рис. 2.63) дизель-поезда состоит из электродвигателя постоянного тока смешанного возбуждения, механизма зацепления и тягового электромагнита. Момент стартера на валу при пуске равен 160 Н·м, номинальная мощность 0,3 кВт и частота вращения 2500 об/мин.

При подаче питания от аккумуляторной батареи к электростартеру ток протекает сначала по катушке *4* тягового электромагнита. Якорь *3* электромагнита втягивается внутрь катушки и, преодолевая сопротивление пружин *2*, *11*, *14*, выдвигает наружу хвостовик *17* с шестерней на конце. Одновременно с поступательным движением хвостовик начинает вращаться. Вращательное движение передается через эвольвентное шлицевое соединение гайки *13*, которая при поступательном перемещении свинчивается по прямой четырехходовой винтовой резьбе вала *8*. Если при перемещении хвостовика зубья шестерни не войдут в зацепление с зубьями венца маховика (произойдет натыкание), то поступательное движение хвостовика прекратится. Однако якорь *9* стартера будет продолжать перемещаться за счет сжатия пружины. При этом гайка будет продолжать двигаться поступательно и передавать вращение хвостовику и шестерне до тех пор, пока зубья совпадут. Как только зубья совпали, хвостовик передвинется на 25 мм за счет сжа-

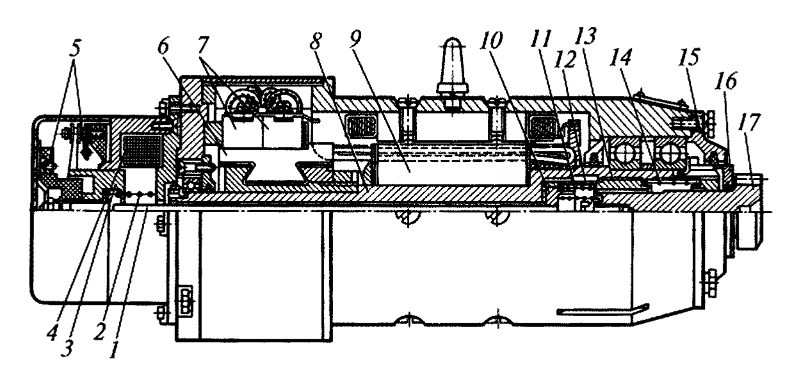


Рис. 2.63. Электростартер ЭС-1:
1 — шток; *2* — возвратная пружина; *3*, *4* — якорь и катушка тягового электромагнита; *5* — контакты блокировочного контакта; *6* — коллектор; *7* — щетки; *8* — вал; *9* — якорь электростартера; *10* — втулка; *11*, *12* — буферные пружины; *13*, *14* — гайка и пружина механизма зацепления; *15* — крышка; *16* — гайка; *17* — хвостовик

тых пружин *11, 12* и произойдет надежное зацепление. При входе шестерни в зацепление замкнутся контакты блокировочного устройства *5* тягового электромагнита, электростартер подключится к батарее, а обмотка тягового электромагнита включится параллельно.

После того как произошел пуск дизеля, частота вращения его коленчатого вала станет больше, чем вала электростартера, т.е. вал дизеля станет ведущим, а вал электростартера — ведомым. В результате хвостовик будет иметь частоту вращения бóльшую, чем частота вращения якоря. Вследствие этого гайка *13* будет свинчиваться в обратном направлении и увлекать за собой хвостовик, выводя его из зацепления, блокировочные контакты *5* разомкнутся и отключат стартер.

***Электродвигатели* серии «П»** применяются на тепловозах в качестве привода маслопрокачивающих и топливоподкачивающих насосов, а также привода вентиляторов кабины, кузова и калорифера. Они получают питание от аккумуляторной батареи или вспомогательного генератора.

Основная часть серии «П» охватывает генераторы и двигатели с номинальной мощностью 0,3—200 кВт и разбита на 11 габаритов (размеров). Машины каждого габарита имеют определенный диаметр якоря D_a.

Номер габарита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D_a	883	106	120	138	162	195	210	245	294	327	368

Каждый габарит включает в себя машины с двумя различными длинами сердечника якоря. Основное исполнение машин серии П одиннадцати габаритов — брызгозащищенное.

Станина *9* (см. рис. 2.64) выполнена из стали, имеет цилиндрическую форму, опирается на лапы. Сверху находится рым-болт для транспортировки.

К внутренней части станины прикреплены главные полюсы, сердечники которых выполнены из отдельных листов электротехнической стали и крепятся к станине двумя болтами каждый.

В качестве примера рассмотрим устройство ***электродвигателя* П22** (рис. 2.64), получившего наибольшее распространение.

Станина 9 цилиндрической формы выполнена из стали. К ее торцам болтами прикреплены передний *3* и задний *12* подшип-

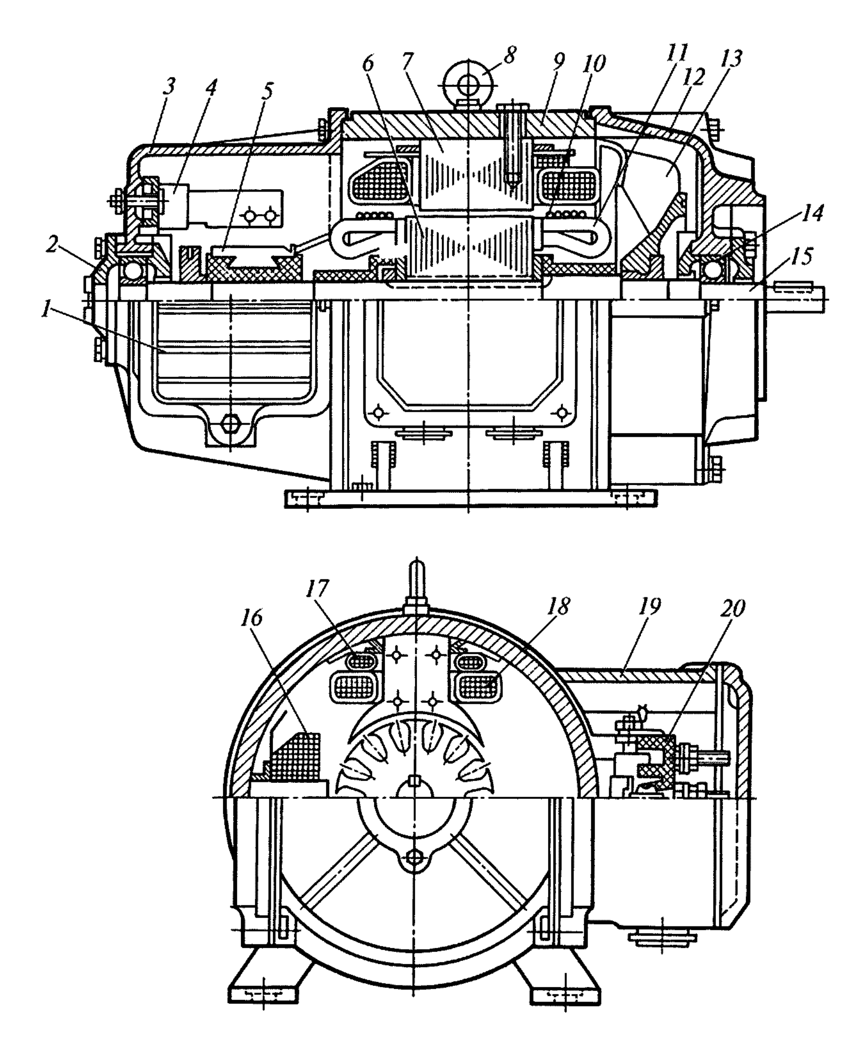


Рис. 2.64. Электродвигатель П22:
1 — жалюзи; *2* — крышка подшипника; *3*, *12* — передний и задний подшипниковые щиты; *4* — траверса; *5* — коллектор; *6* — сердечник якоря; *7* — сердечник добавочного полюса; *8* — рым-болт; *9* — станина; *10* — проволочный бандаж; *11* — лобовая часть обмотки якоря; *13* — вентиляторное колесо; *14* — шарикоподшипник; *15* — вал; *16* — катушка добавочного полюса; *17*, *18* — катушки последовательного и параллельного возбуждения; *19* — клеммная коробка; *20* — клеммная доска

никовые щиты. К внутренней поверхности станины прикреплены два главных и один добавочный полюс. Вместо второго добавочного полюса установлена клеммная коробка *19*.

Сердечник *главного полюса* изготовлен из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, покрытых лаком. Во избежание распушения крайние листы сердечника выполнены толщиной 2 мм из стали МСт3. Листы стянуты четырьмя заклепками. На сердечнике главного полюса находятся две катушки: параллельного возбуждения *18* и последовательного *17*. Катушка последовательного возбуждения выполнена изолированным медным проводом диаметром 2,26 мм и содержит 12 витков, а катушка параллельного возбуждения выполнена таким же проводом диаметром 0,51 мм и содержит 1100 витков.

Сердечник *7 добавочного полюса* также набран из листов электротехнической стали толщиной 11 мм. Катушка добавочного полюса выполнена изолированным медным проводом диаметром 2,26 мм с числом витков 103.

Сердечник *6 якоря* набран из покрытых лаком листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм и укреплен на валу посредством шпонки и двух упорных колец. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена простая петлевая обмотка. В пазах обмотку удерживают текстолитовые клинья, а лобовые части *11* закреплены проволочным бандажом *10*.

В переднем подшипниковым щите *3* находится траверса *4*, к которой прикреплены *щеткодержатели*. Нажатие на щетку осуществляется пружиной. Зазор между щеткодержателем и коллектором — 2 мм. Основание коллектора *5* выполнено в виде пластмассовой втулки, которая напрессована на вал *15* якоря.

Вентиляторное колесо 13 насажено на вал и засасывает охлаждающий воздух через жалюзи *1* со стороны коллектора. Воздух омывает якорь и полюсы с обмотками возбуждения и выбрасывается наружу через отверстия, расположенные в подшипниковом щите со стороны вентилятора.

Электродвигатель **МН.** На тепловозе ЧМЭ3 установлен маслопрокачивающий агрегат, состоящий из масляного насоса и приводного электродвигателя МН (рис. 2.65, *а*). К внутренней стороне *стальной станины 5* прикреплены болтами четыре главных и четыре добавочных полюса.

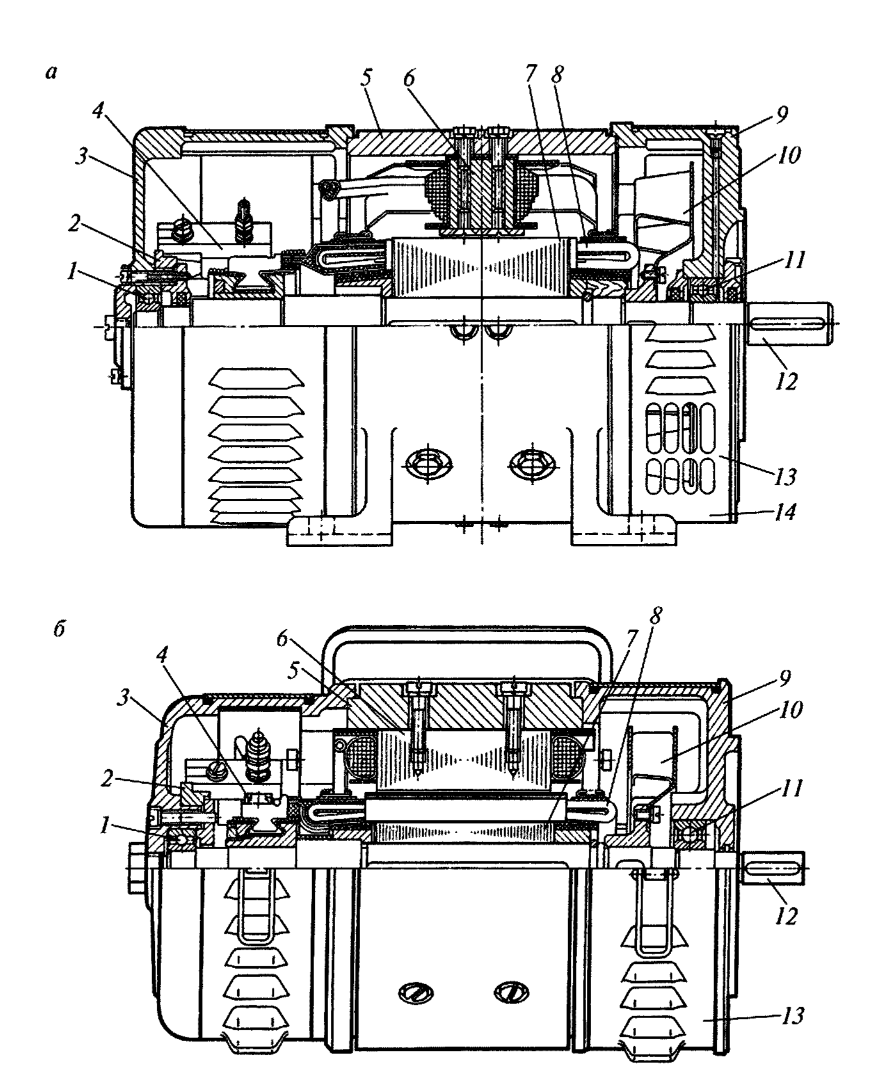


Рис. 2.65. Вспомогательные электродвигатели приводов:
а — маслопрокачивающего насоса МН; *б* — вентилятора калорифера МК; *1*, *11* — шариковые подшипники; *2* — траверса; *3*, *9* — передний и задний подшипниковые щиты; *4* — коллектор; *5* — станина; *6* — добавочный (для электродвигателя МК — главный) полюс; *7* — сердечник якоря; *8* — обмотка якоря; *10* — вентиляторное колесо; *12* — вал якоря; *13* — съемные жалюзи; *14* — опорная лапа

Сердечник *главного полюса* набран из отдельных листов электротехнической стали, стянутых между собой четырьмя заклепками. Катушка главного полюса выполнена изолированным медным проводом квадратного сечения.

Стальной сердечник *добавочного полюса 6* выполнен сплошным. К полюсному наконечнику прикреплен двумя винтами угольник, являющийся упором для катушки, которая выполнена изолированным медным проводом.

На вал *12* напрессован сердечник *якоря 7*, который набран из листов электротехнической стали, стянутых двумя нажимными шайбами. В сердечнике выполнены пазы, куда уложена простая волновая обмотка *8*, каждая секция которой состоит из 16 витков изолированного медного провода. Коллектор *4* имеет 69 коллекторных пластин. Пластины коллектора изолированы друг от друга миканитовыми прокладками.

Вал якоря опирается на два шарикоподшипника *1* и *11*, размещенных в подшипниковых щитах. Передние и задние крышки, стянутые тремя болтами, образуют смазочные камеры, в которые закладывают смазку. При ремонтах в камеру подшипника *1* смазку добавляют через отверстие в передней крышке, а в камеру подшипника *11* — через отверстие в подшипниковом щите *9*, заглушенное винтом М5. В задней и передней крышках со стороны свободного конца вала поставлены сальники, предотвращающие попадание смазки внутрь электродвигателя.

Подшипниковые щиты отлиты из чугуна и прикреплены к станине болтами. Смотровые люки щитов закрыты съемными жалюзями *13*, зафиксированными пружинным замком.

К переднему щиту *3* прикреплена чугунная траверса *2* с четырьмя текстолитовыми держателями, в каждом из которых укреплен *щеткодержатель* с одной щеткой.

Вентиляторное колесо 10, отлитое из алюминиевого сплава, прикреплено винтами к стальной ступице, напрессованной на вал *12*. Выступающий конец вала имеет шпоночную канавку для установки полумуфты. Вторая полумуфта укреплена на валике ведущей шестерни маслопрокачивающего насоса.

Электродвигатель МК (рис. 2.65, *б*) предназначен для привода вентилятора калорифера и установлен в кабине машиниста под пультом управления. От электродвигателя МН он отличается мень-

шими размерами и отсутствием добавочных полюсов. Сердечники *главных полюсов* набраны из отдельных листов электротехнической стали; катушки выполнены изолированным медным проводом. Волновая обмотка *якоря* уложена в пазы якоря. Четыре *щеткодержателя* укреплены на общей траверсе. На выступающий конец вала якоря, имеющий шпонку, напрессована пластмассовая крыльчатка, дополнительно укрепленная винтом с левой резьбой.

Стартер-генератор **ПСГ** (рис. 2.66) предназначен для работы в двух режимах: стартерном (при пуске дизеля) — в качестве двигателя последовательного возбуждения с питанием от аккумуляторной батареи; и в генераторном — в качестве вспомогательного генератора с независимым возбуждением. В режиме вспомогательного генератора он питает электрические цепи управления, освещения и заряда аккумуляторной батареи, а также электродвигатели постоянного тока масляного и топливного насосов и др.

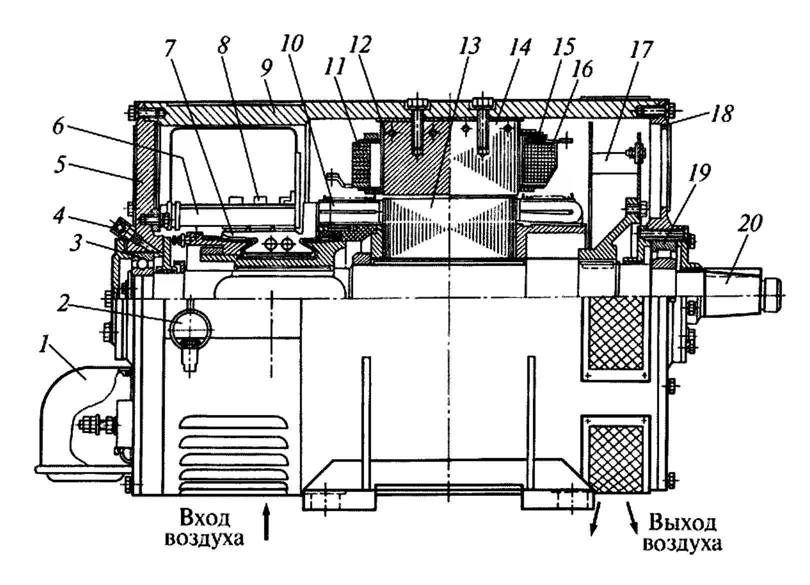


Рис. 2.66. Стартер-генератор ПСГ:
1 — коробка выводов; *2* — замок крышки; *3, 19* — подшипники; *4* — масленка; *5, 18* — подшипниковые щиты; *6* — кронштейн; *7* — коллектор; *8* — щеткодержатель; *9* — корпус; *10, 13* — обмотка и сердечник якоря; *11, 12* — катушка и сердечник добавочного полюса; *14* — сердечник главного полюса; *15* — пусковая катушка; *16* — катушка независимого возбуждения; *17* — вентилятор; *20* — вал

Остов стартер-генератора цилиндрической формы, содержит четыре главных и четыре добавочных полюса. На каждом главном полюсе размещены по две обмотки возбуждения: последовательная и параллельная. Последовательная (пусковая) используется в двигательном кратковременном режиме при пуске дизеля с питанием от аккумуляторной батареи, а независимая — в генераторном продолжительном режиме работы в качестве вспомогательного генератора. К торцовым сторонам станины прикреплены передний и задний подшипниковые щиты.

Якорь установлен на двух подшипниках: шариковом 76-313 со стороны коллектора и роликовом 3261 К1М со стороны привода. Вал стартер-генератора приводится во вращение от раздаточного редуктора дизеля. На тепловозе он установлен на корпусе тягового генератора или на раме тепловоза.

Стартер-генератор **5СГ** (рис. 2.67) представляет собой четырехполюсную машину постоянного тока и состоит из станины *6*, подшипниковых щитов *4* и *15*, главных *13* и добавочных *10* полю-

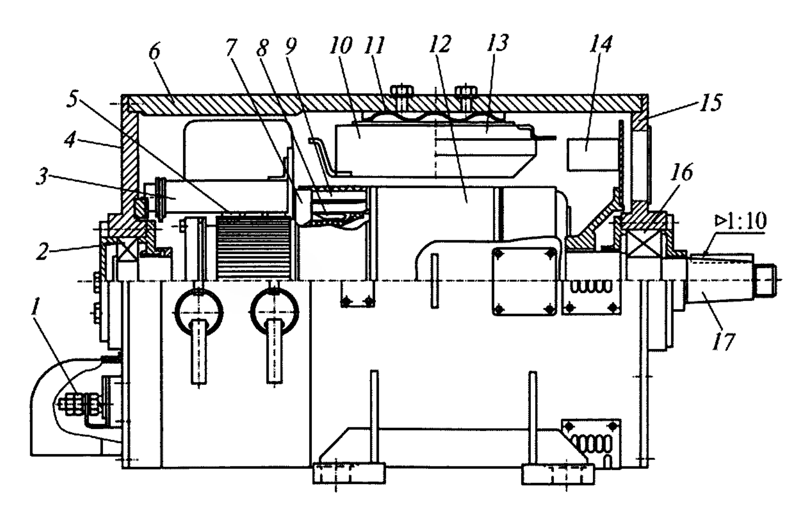


Рис. 2.67. Стартер-генератор 5 СГ:
1 — клеммная коробка; *2*, *16* — подшипник; *3* — щеткодержатель; *4*, *15* — подшипниковые щиты; *5* — щетка; *6* — станина; *7* — коллекторная пластина; *8* — уравнительное соединение; *9* — обмотка якоря; *10* — добавочный полюс; *11* — пружинная прокладка; *12* — якорь; *13* — главный полюс; *14* — вентилятор; *17* — вал

сов, якоря *12* с обмоткой *9* и уравнителями *8*, щеткодержателей *3* с траверсой, коллектора *7*.

Станина имеет цилиндрическую форму и выполнена из углеродистой стали. К станине приварены снизу опорные лапы для крепления, а сбоку — проушины для транспортировки. С торцов станина закрыта подшипниковыми щитами *4*, *15*. К внутренней части станины посредством болтов прикреплены сердечники главных и добавочных полюсов с катушками возбуждения.

На *главном полюсе* расположены по две катушки возбуждения: последовательного возбуждения (пусковая) и независимого возбуждения. Катушка последовательного возбуждения имеет три витка, намотанных из медной шины сечением 1,81×35 мм на узкое ребро. Межвитковая изоляция выполнена из асбестовой бумаги, пропитанной в лаке КО-916К. Для корпусной изоляции применена микалента, пропитанная в таком же лаке.

Катушка независимого возбуждения намотана медным обмоточным проводом ПСДК-Л диаметром 2,24 мм. Корпусная изоляция также выполнена из микаленты, пропитанной в лаке КО-916К.

Сердечник главного полюса набран из листов электротехнической стали.

Якорь состоит из вала *17*, сердечника *12*, обмотки якоря *9*, коллектора *7*, вентилятора *14*. Вал якоря выполнен из стали, на вал напрессован сердечник, выполненный из листов электротехнической стали толщиной 2 мм, который стянут стальными шпильками и зафиксирован на валу шпонкой. От смещения сердечник удерживается с одной стороны корпусом обмоткодержателя, а с другой — корпусом коллектора. Для предотвращения распушения крайних листов сердечника они выполнены утолщенными из углеродистой стали.

Обмотка якоря простая петлевая, уложена в прямоугольные пазы сердечника и закреплена в них текстолитовыми клиньями и бандажами из стеклоленты класса нагревостойкости F.

Уравнительные соединения *8* расположены со стороны коллектора под лобовыми частями обмотки якоря и подсоединены к «петушкам» коллектора *7*.

В переднем подшипниковом щите *4* установлен подшипник 76-313, а в заднем щите *15* — подшипник 70-32315К1М.

К переднему подшипниковому щиту крепится траверса, на которой расположены щеткодержатели *3* со щетками. Нажатие на щетку осуществляется пружинами.

Вал стартер-генератора приводится во вращение от раздаточного редуктора дизеля.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют электрические машины по признакам, связанным с защитой от внешних воздействий?
2. Что характеризуют номинальные данные электрической машины?
3. Как классифицируют электрические машины по мощности?
4. Какую функцию выполняют коллекторы в генераторах, в двигателях?
5. Каково устройство щеткодержателя?
6. В чем отличие якоря электрической машины от ротора?
7. Почему возникают вихревые токи в электрической машине постоянного тока?
8. Дайте определение полюсному делению.
9. Как выбирают ширину секции?
10. Сколько параллельных ветвей содержит простая петлевая обмотка?
11. Для какой цели применяют сложные петлевые обмотки?
12. В чем отличие простой петлевой обмотки от простой волновой?
13. Как производится выбор обмоток?
14. Каковы условия симметрии обмоток?
15. От каких параметров зависит ЭДС, индуктированная в обмотках якоря?
16. Какие участки содержит магнитная цепь машины постоянного тока?
17. Почему реакция якоря оказывает вредное влияние на электрическую машину постоянного тока?
18. Какие причины вызывают искрение на коллекторе?
19. Какие степени искрения предусмотрены действующими стандартами?
20. В каких случаях коммутация будет прямолинейной? Криволинейной замедленной? Криволинейной ускоренной?

21. Какие требования предъявляют к щеткам?

22. Какие моменты сил действуют в генераторах постоянного тока?

23. Каковы условия самовозбуждения генераторов постоянного тока?

24. Что такое «встречное» и «согласное» включение обмоток возбуждения?

25. В каком месте располагают пусковую обмотку в генераторе ГП-311Б?

26. Почему в генераторе ГП-311Б подшипниковый щит выполнен каркасной конструкции с выемной ступицей?

27. Каково назначение траверсы в тяговых генераторах?

28. Какое возбуждение применяют в тяговых электродвигателях?

29. Какие вспомогательные машины применяют в дизель-поездах?

30. Какие виды вентиляции применяют в тяговых электрических машинах?

31. Какова роль расщепленных полюсов возбудителя?

32. Каковы условия работы тягового электродвигателя тепловоза?

Глава 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3.1. Классификация и принципы действия

Машины переменного тока подразделяются в зависимости от электромагнитной системы на синхронные, асинхронные и коллекторные, а в зависимости от числа фаз — на на однофазные, двухфазные, трехфазные и многофазные.

Из электрических машин переменного тока на тяговом подвижном составе преимущественно применяют трехфазные. Однофазные используют редко, однако довольно часто используется принцип включения трехфазного двигателя в однофазную сеть.

В основу работы электрических машин переменного тока положен принцип образования вращающегося магнитного поля. Если частота вращения вращающегося магнитного поля статора и ротора одинаковы, то такие машины называются *синхронными*. Если частоты вращения вращающегося магнитного поля статора и ротора отличаются друг от друга, то такая машина называется *асинхронной*. Ротор асинхронной машины вращается несинхронно относительно вращающегося магнитного поля.

Как синхронные, так и асинхронные машины обладают свойством обратимости, т.е. каждая из них может работать как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Особый класс машин составляют коллекторные машины переменного тока. На ТПС коллекторные машины переменного тока практически не применяются. Чаще всего применяют универсальные коллекторные двигатели, работающие как на постоянном, так и на переменном токе в качестве привода ручного электрифицированного инструмента, а также в устройствах автоматики.

Устройство статора. Вращающееся магнитное поле машин переменного тока замыкается по сердечнику статора (рис. 3.1, *а*), который собирается из отдельных листов электротехнической стали, обычно покрытых с обеих сторон масляно-канифольным изоляционным лаком.

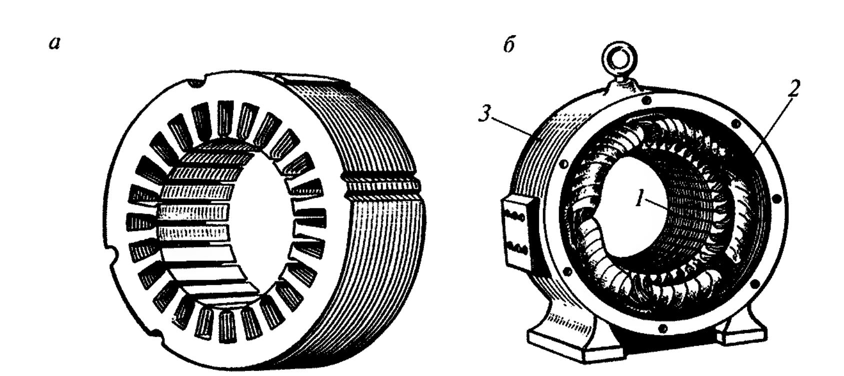


Рис. 3.1. Статор машины переменного тока:
а — сердечник статора; *б* — статор с обмоткой; *1* — сердечник; *2* — обмотка статора; *3* — станина (корпус)

Листы сердечников статоров электрических машин малой мощности иногда не покрывают лаком, так как в этом случае изоляцией является оксидная пленка на поверхности листов, которую создают искусственным путем или же она появляется естественным образом.

Сердечник статора 1 (рис. 3.1, *б*) запрессовывают и закрепляют в корпусе *3*. В сердечнике делают пазы, куда укладывают трехфазную обмотку *2*, выводы которой присоединяют к сети трехфазного тока. Воздушный зазор между статором и ротором имеет минимальный размер, допускаемый с точки зрения точности сборки и механической жесткости конструкции. Чем меньше зазор, тем меньше магнитное сопротивление для вращающегося магнитного поля. Минимальный зазор обеспечивает уменьшение намагничивающего тока, требуемого для создания в машине магнитного потока. Снижение намагничивающего тока позволяет повысить коэффициент мощности двигателя.

Обмотки статора. Простейшим элементом обмотки статора является секция, которая состоит из нескольких витков, образующих катушку. Катушку располагают в пазах. Ширина катушки y приближенно равна полюсному делению τ: $y = \tau$. Если катушки имеют разную ширину, то катушки, составляющие катушечную группу, охватывает одна другую (рис. 3.2).

Обмотки статора характеризуются следующими параметрами: числом пазов в сердечнике статора Z; числом пар полюсов p; чис-

лом фаз m; числом пазов, приходящихся на полюс и фазу q. Они связаны соотношением

$$Z = 2mpq. \qquad (3.1)$$

Обмотки статора подразделяются на *однослойные* и *двухслойные*. У двухслойных катушек пазовая сторона катушки занимает половину паза по его высоте, а другую половину этого паза занимает пазовая сторона другой катушки. Двухслойные обмотки подразделяются на петлевые и волновые.

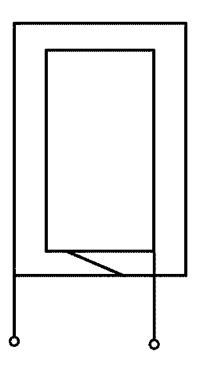


Рис. 3.2. Катушечная группа

Однослойные обмотки различают по выполнению катушек и размещению лобовых частей.

Рассмотрим построение трехфазной однослойной обмотки по следующим исходным данным: $Z = 24$; $p = 2$; $m = 3$; $q = 24/4{\cdot}3 = 2$. Для удобства и лучшего понимания построения выполним несколько предварительных операций. Вначале располагаем четыре полюсных деления, в каждом — по три фазы — A, B, C (рис. 3.3). За фазой A располагается конец фазы C — ее вывод Z, а затем фаза B. Таким образом получается последовательность следования фаз A, C, B. Во втором полюсном делении все повторяется: начало фазы A — ее вывод X; вывод Z — начало фазы C; начало фазы B — ее вывод Y. Таким образом снова получается последовательность следования фаз A, C, B.

На каждом полюсном делении соблюдаем указанную последовательность фаз. После этого проводим линии — проводники, расположенные в пазах статора (рис. 3.4). Для наглядности проводники, относящиеся к одинаковым фазам, проводим сплошными линиями (фаза A) или штриховыми (фазы B и C). Затем проводники одноименных фаз соединяем в общую сеть (рис. 3.5, *а*). Лобовые части катушек располагаются в двух поверхностях (рис. 3.5, *б*). В некоторых случаях, например в двухполюсных машинах, $q = 6$—10 и лобовые части двухполюсной машины получаются довольно длинными. Поэтому при четном q

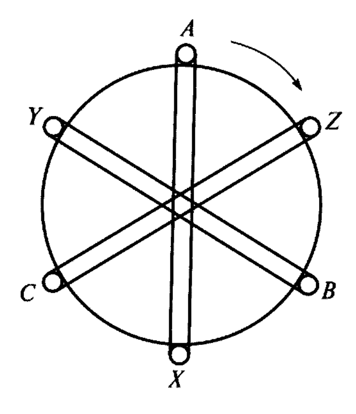


Рис. 3.3. Расположение катушек в пазах статора

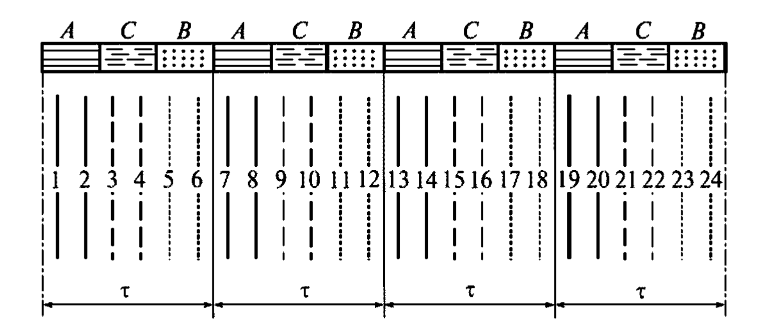


Рис. 3.4. Распределение пазов и сторон катушек по фазам на развернутой схеме обмотки статора

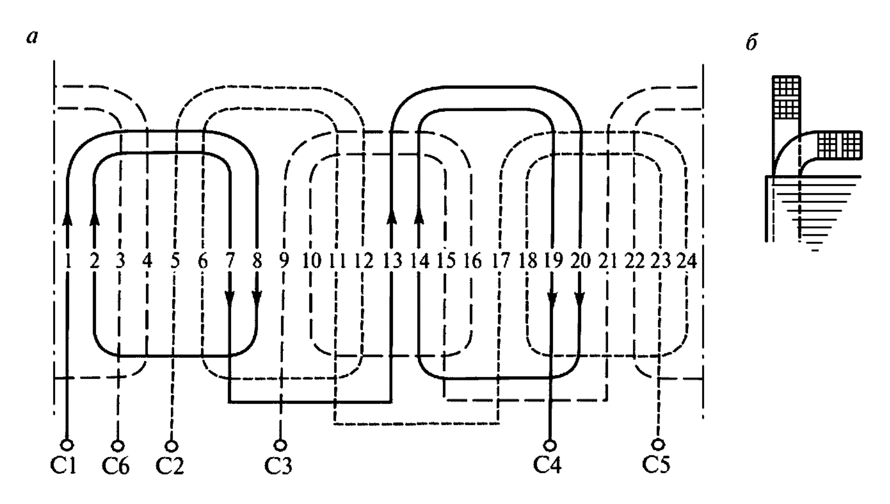


Рис. 3.5. Схема трехфазной однослойной обмотки с концентрическими катушками:
а — схема; *б* — расположение лобовых частей

каждую катушечную группу обычно разделяют на две половины и отгибают в разные стороны. В этом случае получается концентрическая обмотка с более короткими лобовыми частями.

В двухслойных обмотках одна сторона катушки занимает нижнюю часть паза, а вторая — верхнюю. Распределение сторон катушек одного слоя на двойном полюсном делении зависит от принятого количества фазных зон на двойном полюсном делении. Ка-

тушки двухслойной обмотки имеют одинаковую форму, что облегчает их изготовление и обеспечивает одинаковые сопротивления фазных обмоток как при последовательном, так и при параллельном соединении катушечных групп.

Широкое применение двухслойных обмоток обусловлено следующими преимуществами:

– возможностью укорочения шага катушек, при котором улучшаются электромагнитные характеристики и уменьшаются затраты обмоточных материалов;

– одинаковыми размерами и формами всех катушек, что упрощает и облегчает изготовление обмоток;

– относительно простой формой лобовых частей катушек, что упрощает изготовление обмоток.

Преимущественно применяются петлевые обмотки, волновые обмотки используются обычно при числе витков $w = 1$.

Двухслойные обмотки могут иметь как целое, так и дробное число пазов на полюс и фазу q. В последнем случае обмотки называют дробными.

Рассмотрим пример построения двухслойной трехфазной обмотки с $Z = 24$; $2p = 4$; $m = 3$.

В этом случае

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2$$

и полюсное деление, выраженное в зубцовых делениях, будет равно

$$\tau = mq = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

Примем шаг обмотки $y = 5$ зубцовых делений. Тогда относительный шаг

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6} = 0{,}833.$$

На рис. 3.6 показана схема этой двухслойной петлевой обмотки для $Z = 24$, $2p = 4$ и укороченном шаге $y = 5$.

При *одновитковых* катушках и $2p > 2$ для уменьшения длины соединений между катушечными группами обычно применяют волновую обмотку (рис. 3.7).

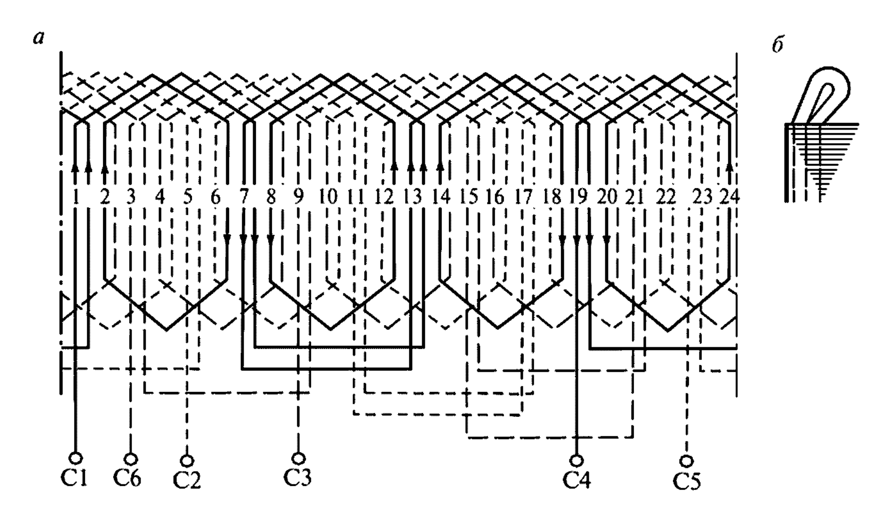


Рис. 3.6. Схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки:
а — схема; *б* — расположение лобовых частей

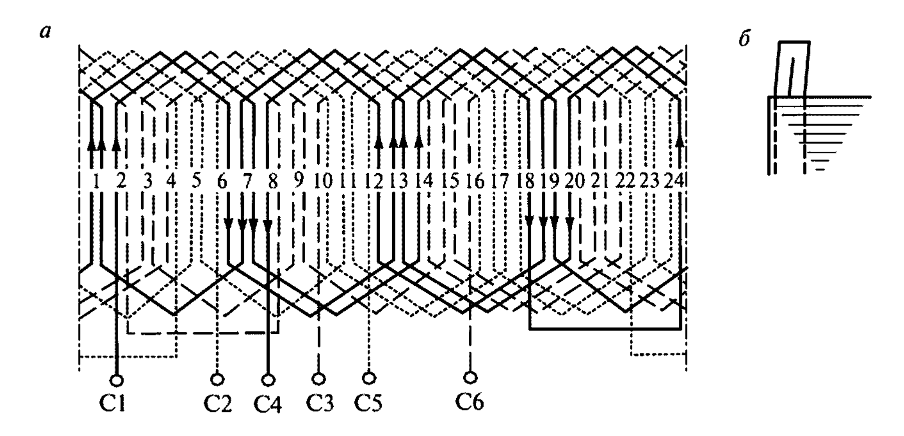


Рис. 3.7. Схема трехфазной двухслойной волновой обмотки:
а — схема; *б* — расположение лобовых частей

Образование вращающегося магнитного поля. Для определения направления вращающегося магнитного поля и частоты вращения вектора МДС F_1, на трехфазную обмотку статора, каждая фаза которой состоит из одной катушки, подаем трехфазное напряжение, при этом обмотка статора соединена «звездой» (хотя на образование вращающегося магнитного поля соединение обмоток статора

«звездой» или «треугольником» влияние не оказывает). На волновой диаграмме токов (рис. 3.8, *а*) проводим вертикальные линии, соответствующие различным моментам времени и обозначаем их цифрами 0, 1, 2, 3. Ниже под каждой линией изображаем обмотку статора. В момент времени 0 ток в фазе *A* равен нулю, в фазе *C* имеет положительное направление, а в фазе *B* — отрицательное. Это направление токов отмечаем в катушках статора. Соответственно, концы фаз катушек *X, Y, Z* будут иметь противоположное направление. По правилу буравчика определим направление магнитных силовых линий вокруг катушек, а также направление магнитодвижущих сил (МДС) F_1 трехфазной обмотки статора. Из построенной диаграммы видно, что вектор МДС F_1 поворачивается относительно своего положения на такой же угол в пространстве, что и мгновенные значения токов во времени, и за один период переменного тока делает полный оборот на 360°.

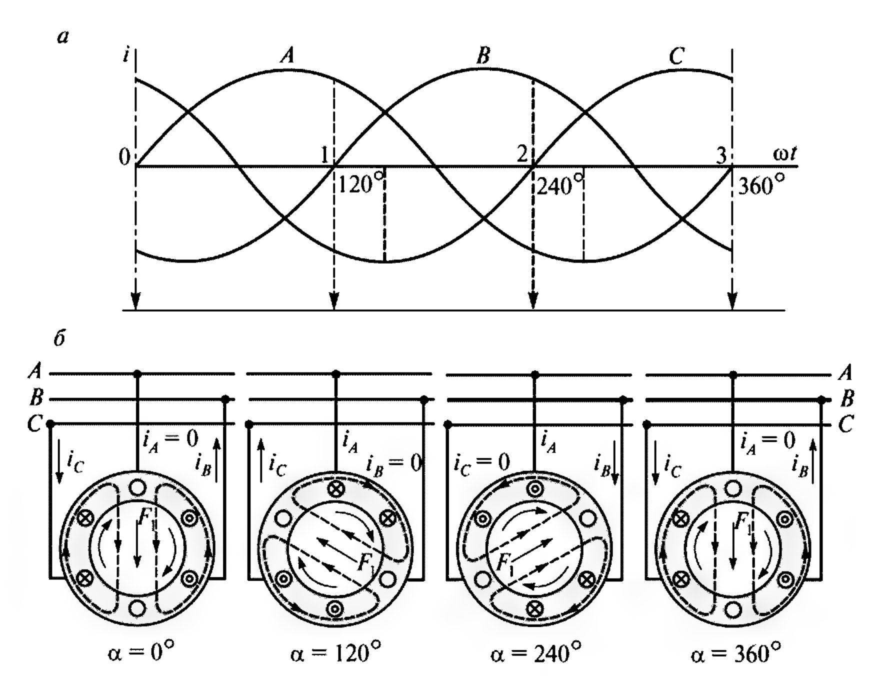


Рис. 3.8. Волновая диаграмма трехфазного тока (*а*) и образование вращающегося магнитного поля (*б*)

В общем случае получаем, что частота вращения вектора МДС n_1 пропорциональна частоте тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p.

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}. \qquad (3.2)$$

3.2. Асинхронные машины

Принцип действия и режимы работы. Как указывалось выше, статоры синхронных и асинхронных машин одинаковы. Ротор асинхронной машины состоит из вала, сердечника и обмотки. Обмотка ротора состоит из восьми алюминиевых стержней, расположенных в пазах сердечника ротора и замкнутым по концам этих стержней алюминиевыми кольцами. Если включить обмотку статора в сеть, то образуется вращающееся магнитное поле статора с частотой вращения, определяемой выражением (3.2).

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмоток статора и ротора и индуктирует в них ЭДС. В обмотке статора появляется ЭДС самоиндукции, а в обмотке ротора — ЭДС взаимоиндукции. Так как обмотка ротора замкнута, то в ней потечет ток, создавая магнитное поле ротора. Взаимодействие магнитных полей статора и ротора приводит к появлению электромагнитной силы $F_{эм}$, направление которой определяется по правилу «левой руки». Совокупность сил $F_{эм}$ создает на роторе электромагнитный момент M, который приводит ротор во вращение с частотой n_2. Вращающийся вал ротора передает вращение рабочему механизму. Таким образом асинхронная машина будет работать в *режиме двигателя.*

Частота вращения ротора асинхронного двигателя n_2 всегда меньше частоты вращения вращающегося магнитного поля статора n_1. Если бы частоты вращения магнитного поля статора и ротора были бы одинаковыми, проводник ротора и магнитная силовая линия статора не пересекали бы друг друга, и в проводниках ротора не индуктировалась бы ЭДС взаимоиндукции. По проводникам ротора не протекал бы ток, магнитный поток ротора отсутствовал бы. Также отсутствовала бы электромагнитная сила $F_{эм}$ и электромагнитный момент M.

Отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля статора характеризуется *скольжением*, S — относительной разностью частот вращения вращающегося магнитного поля статора и самого ротора

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_2}. \qquad (3.3)$$

Скольжение выражают в долях единицы либо в %. В последнем случае величину, полученную по выражению (3.3), умножают на 100. Обычно скольжение у асинхронных двигателях составляет 2—6 %.

Частота вращения поля статора относительно поля ротора равна разности частот вращения $n_s = n_1 - n_2$. Вращающееся магнитное поле, обгоняя поле ротора с частотой вращения n_s, индуктирует в обмотках ротора ЭДС с частотой f_2. Частота тока в роторе

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s. \qquad (3.4)$$

Частота тока вращающегося ротора составляет 1—3 Гц.

С увеличением момента сопротивления M_c частота вращения ротора n_2 уменьшается. Поэтому для двигательного режима скольжение изменяется в диапазоне

$$0 < s < 1. \qquad (3.5)$$

В *генераторном режиме* необходимо возбудить асинхронную машину, подключив ее обмотку статора к трехфазной сети, и с помощью приводного двигателя привести во вращение ротор асинхронной машины в направлении вращения магнитного поля статора с частотой, превышающей частоту вращения этого поля $n_2 > n_1$. В этом случае ротор будет обгонять поле статора и скольжение станет отрицательным

$$S = \frac{-n_2 + n_1}{n_1}. \qquad (3.6)$$

ЭДС обмотки ротора изменит свое направление и превысит напряжение сети. Вследствие этого асинхронная машина из потребителя электроэнергии станет источником и будет отдавать в сеть активную мощность P_2, т.е. будет работать генератором.

Скольжение в генераторном режиме находится в диапазоне

$$-\infty < s < 0. \qquad (3.7)$$

Таким образом, скольжение асинхронной машины в генераторном режиме может принимать любые отрицательные значения, однако практически генераторный режим асинхронной машины не нашел применения, реально применяется лишь двигательный режим. Что же касается генераторов переменного тока, то наибольшее распространение получили синхронные генераторы, о которых речь пойдет ниже.

Кроме того, для асинхронного генератора необходим источник переменного тока, который создает возбуждение, т.е. создает вращающееся магнитное поле. Поэтому в невозбужденной асинхронной машине режим генератора вообще невозможен, и источником переменного тока, как указывалось выше, служат в основном синхронные генераторы.

Если у работающего асинхронного двигателя произвести реверсирование, т.е. изменить направление вращения ротора, асинхронный двигатель под действием сил инерции все равно будет продолжать вращаться в прежнем направлении, то есть поле статора и ротор будут вращаться в прежних направлениях. Однако электромагнитный момент, действующий в сторону вращения поля статора, будет тормозить ротор. Скольжение в этом режиме будет находиться в пределах

$$1 < S < +\infty.$$

На практике в этом режиме $1 < S < 2$.

В режиме противовключения машина потребляет также механическую мощность с вала или с ротора, так как внешний вращающий момент действует в сторону вращения вала. Как мощность, потребляемая из сети, так и мощность, потребляемая из вала, расходуется на потери в машине. Полезной мощности в этом режиме машина не развивает, а в отношении нагрева рассматриваемый режим является тяжелым.

Из рассмотренных режимов работы асинхронной машины, как указывалось выше, наиболее эффективным является двигательный. На современных локомотивах в качестве тяговых электродвигателей используются именно асинхронные двигатели.

3.3. Асинхронные двигатели

Устройство. Асинхронный двигатель, как и машина постоянного тока, состоит из неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора.

Статор состоит из корпуса *7* (рис. 3.9), в который запрессован сердечник *6*, выполненный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Пластины сердечника покрыты слоем изоляционного лака, собраны в пакет, спрессованы, скреплены специальными скобами или продольными сварными швами по

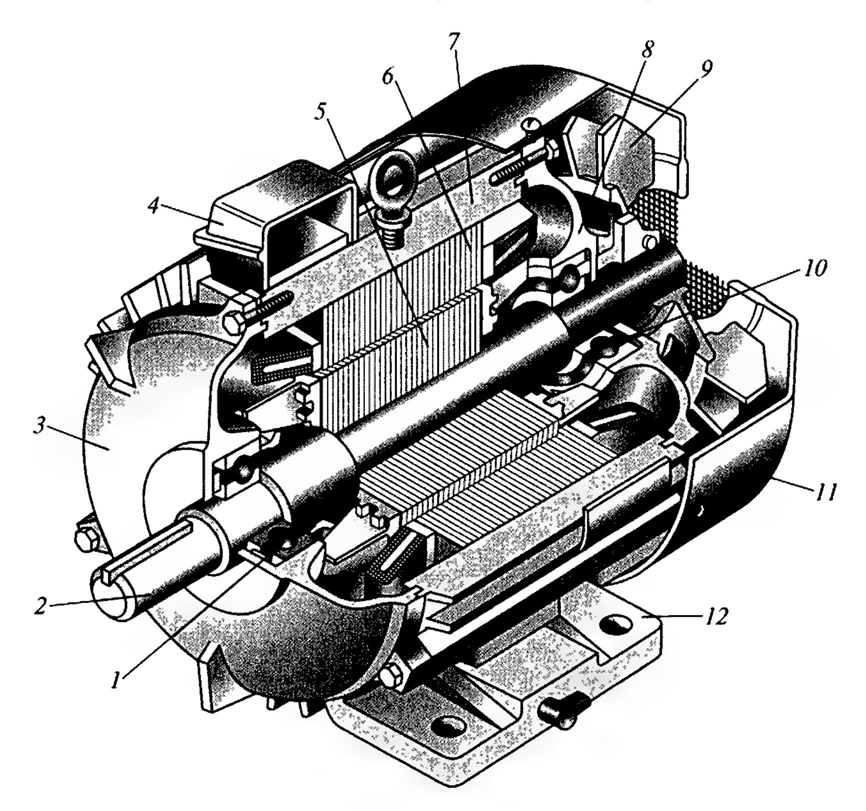


Рис. 3.9. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:
1, *10* — подшипники; *2* — вал; *3*, *8* — подшипниковые щиты; *4* — коробка выводов; *5* — ротор; *6* — сердечник статора; *7* — станина (корпус); *9* — вентилятор; *11* — крышка; *12* — опорные лапы

наружной поверхности пакета. Благодаря такой конструкции значительно уменьшаются вихревые токи, которые возникают в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. В сердечнике выполнены пазы, куда укладывают трехфазную обмотку. Выводы обмотки располагают в коробке выводов *4*. Корпус двигателя отливают из алюминиевого сплава, стали или чугуна.

Если двигатель выполнен в закрытом обдуваемом исполнении, то на корпусе выполняют ребра, увеличивающие поверхность охлаждения.

Ротор может быть короткозамкнутым или фазным. Фазные роторы на ТПС не применяют. Короткозамкнутый ротор *5* состоит из вала *2*, на который напрессован сердечник, выполненный из листов электротехнической стали. В пазы на поверхности сердечника заливают расплавленный алюминий или его сплав; после их отверждения образуются стержни, к которым приваривают кольца. В некоторых случаях стержни и кольца отливают одновременно. При этом получается короткозамкнутая обмотка типа «беличье колесо» (рис. 3.10, *а*). Иногда применяют медные стержни и кольца. В машинах малой мощности кольца отливают вместе с лопатками *3* (рис. 3.10, *б*), которые улучшают охлаждение машины. Листы сердечника ротора не покрывают изоляционным лаком, так как на их поверхности образуется тонкая пленка оксида. Этой меры достаточно для уменьшения вихревых токов, так как их величина невелика вследствие малой частоты перемагничивания.

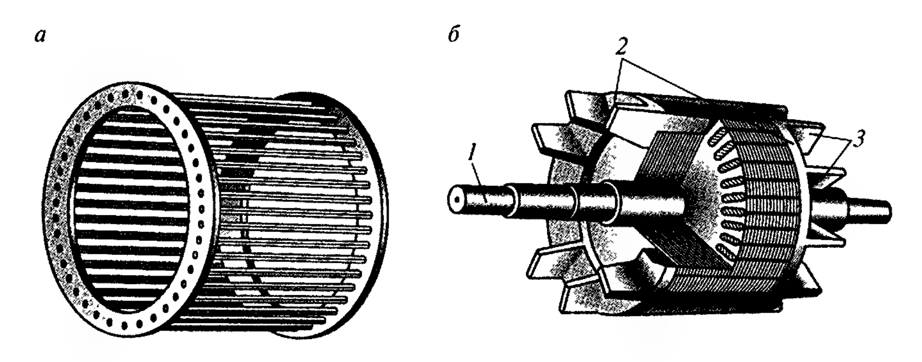


Рис. 3.10. Короткозамкнутый ротор:
а — обмотка ротора; *б* — ротор в сборе; *1* — вал; *2* — кольца; *3* — лопатки

Вал ротора опирается на подшипники качения *1* и *10*, расположенные в подшипниковых щитах *3* и *8* (см. рис. 3.9). Поток воздуха создается центробежным вентилятором *9*, закрытым крышкой *11*. В подшипниковых щитах имеются отверстия, через которые проходит воздух, омывающий внутреннюю полость двигателя. При этом охлаждаются наиболее нагретые части машины, такие как обмотки и сердечники.

Двигатель с фазным ротором (рис. 3.11) конструктивно отличается от двигателя с короткозамкнутым ротором. Статор этого двигателя состоит также из станины (корпуса) *3* и запрессованного в него сердечника *4* с трехфазной обмоткой. С торцов станина закрыта подшипниковыми щитами *2* и *6* с подшипниками качения *1* и *7*. В нижней части станины имеются опорные лапы *10* и коробка выводов *9*. Ротор состоит из вала *8*, на который напрессован сердечник *5*, выполненный из отдельных листов электротехнической стали. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена трехфазная обмотка ротора. Концы обмотки ротора соединены звез-

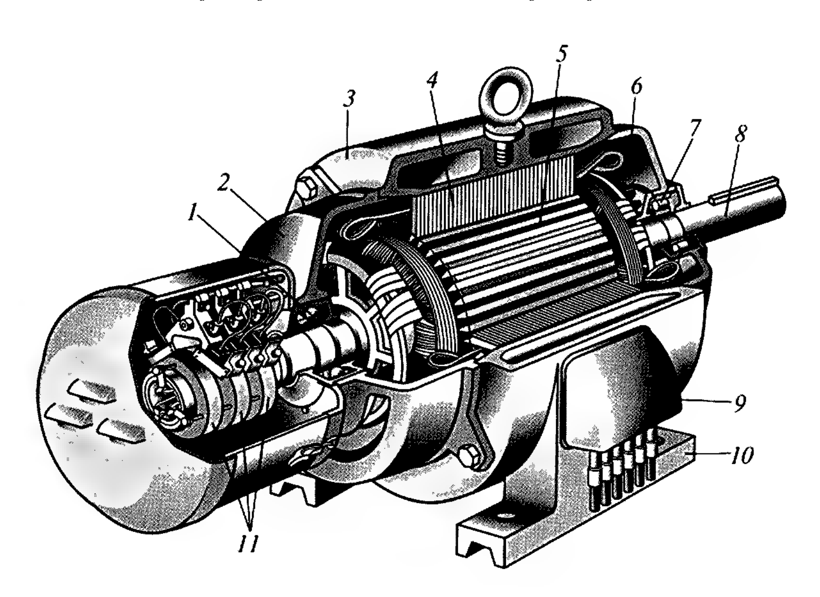


Рис. 3.11. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором: *1*, *7* — подшипники; *2*, *6* — подшипниковые щиты; *3* — корпус; *4* — сердечник статора с обмоткой; *5* — сердечник ротора; *8* — вал; *9* — коробка выводов; *10* — опорные лапы; *11* — контактные кольца

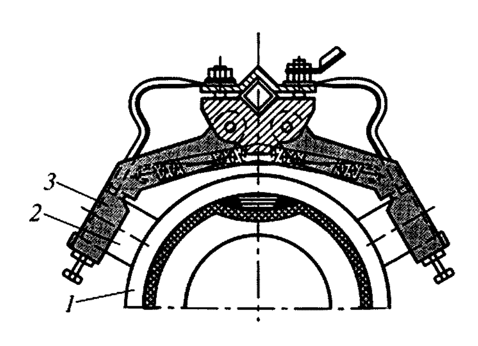


Рис. 3.12. Щеткодержатель асинхронного двигателя:
1 — контактное кольцо; *2* — щетка; *3* — щеткодержатель

дой, а начала присоединены к контактным кольцам *11*, расположенным на валу и изолированным друг от друга и от вала. С кольцами контактируют щетки, помещенные в щеткодержатели. На каждое кольцо *1* (рис. 3.12) обычно накладывают по две щетки *2*, расположенные в щеткодержателях *3*. Каждый щеткодержатель содержит пружины, которые обеспечивают требуемое нажатие щеток к контактным кольцам. Щетки подключают к пусковому реостату. Из-за более сложной конструкции асинхронного двигателя с фазным ротором, последние практически не применяются на ТПС. Их применяют в грузоподъемных кранах, некоторые из которых используют в ремонтных цехах депо.

Как указывалось выше, концы обмоток выводят в коробку выводов *4* (см. рис. 3.9). Начала обмоток обозначают С1, С2, С3, а их концы соответственно С4, С5 и С6 (рис. 3.13, *а*). На табличке, находящейся на корпусе двигателя, нанесены номинальные данные этого двигателя. При наличии в коробке шести выводов указывают два напряжения, отличающиеся друг от друга на $\sqrt{3}$ раз. Например, если двигатель рассчитан для включения в сеть на напряжение 380/220 В, то в сети 380 В его обмотки соединяют «звездой», а в сети 220 В — «треугольником». Клеммы выводов обмоток на панели коробки расположены таким образом, чтобы со-

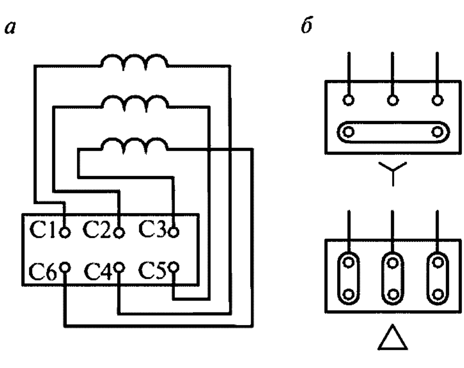


Рис. 3.13. Клеммная коробка выводов обмотки статора:
а — расположение выводов обмотки статора; *б* — положение перемычек при соединении обмоток статора «звездой» или «треугольником»

единения обмоток фаз можно было удобно выполнить с помощью перемычек, без перекрещивания последних (рис. 3.13, *б*). Если в коробке выводов находятся три вывода, то соединение «звездой» или «треугольником» выполнено внутри двигателя и в табличке указывается одно напряжение, которое можно подключить к двигателю.

ЭДС, МДС и токи асинхронного двигателя. При *неподвижном роторе* основной магнитный поток индуктирует в обмотке статора ЭДС

$$E_1 = 4{,}44\,\Phi_m f_1 w_1 k_{об1}, \tag{3.8}$$

где Φ_m — амплитуда магнитного потока, Вб;

f_1 — частота ЭДС;

w_1 — число витков обмотки статора;

$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент, учитывающий распределение проводников по пазам статора, а также укорочение или удлинение шага обмотки.

Кроме основного магнитного потока, который сцепляется с проводниками обмотки статора и ротора, существует еще магнитный поток рассеяния, сцепляющийся только с проводниками одной обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$. Потоки рассеяния создают ЭДС потоков рассеяния

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\dot{I}_1 x_1; \tag{3.9}$$

$$\dot{E}_{2\sigma} = -j\dot{I}_2 x_2, \tag{3.10}$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния фазной обмотки статора, Ом.

ЭДС неподвижного ротора E_2

$$E_2 = 4{,}44\,\Phi_m f_2 w_2 k_{об2},$$

где w_2 — количество витков обмотки ротора;

f_2 — частота тока в роторе, Гц;

$k_{об2}$ — обмоточный коэффициент, учитывающий распределение проводников по пазам ротора, а также укорочение или удлинение шага обмотки.

Ток обмотки статора I_1

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1} = \frac{E_1}{\sqrt{r_1^2 + x_1^2}} = \frac{4{,}44\Phi_m f_1 w_1 k_{об1}}{\sqrt{r_1^2 + \left(j2\pi f_1 L_1\right)^2}}. \tag{3.11}$$

Ток обмотки неподвижного ротора

$$I_2 = \frac{4{,}44\Phi_m f_2 w_2 k_{об2}}{\sqrt{r_2^2 + (j2\pi f_2 L_2)^2}}. \qquad (3.12)$$

Токи в статоре и роторе создают соответственно свои МДС F_1 и F_2

$$\bar{F}_0 = \bar{F}_1 + \bar{F}_2, \qquad (3.13)$$

где $\bar{F}_0$ — результирующая МДС двигателя, численно равная МДС обмотки статора в режиме холостого хода.

При *вращающемся роторе* ЭДС, токи и МДС статора определяются теми же выражениями, что и при неподвижном, отличаются они только выражениями ротора.

Основной магнитный поток Ф, обгоняя ротор с частотой вращения $n_s = n_1 - n_2$, индуктирует в его проводниках ЭДС E_{2s} с учетом (3.4).

$$E_{2s} = 4{,}44\,\Phi_m f_1\, s\, w_2\, k_{об2}, \qquad (3.14)$$

откуда

$$E_{2s} = E_2\, S. \qquad (3.15)$$

Ток вращающегося ротора I_{2s}

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2 + (j2\pi f_2 L_2)}} = \frac{E_2 S}{\sqrt{r_2 + (j2\pi f_2 s L_2)}}. \qquad (3.16)$$

Как указывалось выше, при вращении ротора $s = 5\ \%$, а при неподвижном роторе $s = 100\ \%$. Следовательно, ЭДС неподвижного ротора будет больше ЭДС вращающегося ротора в 100/5 = 20 раз.

Сравнивая формулы (3.12) и (3.16), устанавливаем, что числитель формулы (3.12) больше числителя формулы (3.16) в 20 раз. Однако в формуле (3.16) s входит в знаменатель, в подкоренное выражение. Поэтому знаменатель выражения (3.16) будет меньше знаменателя выражения (3.12) приблизительно в 20 раз, что составляет $20/\sqrt{20} \approx 5$. Поэтому ток вращающегося ротора меньше тока неподвижного ротора примерно в 5—8 раз.

Таким образом, при включении двигателя, когда ротор неподвижен из-за инерции, наблюдается бросок пускового тока, превышающего номинальное значение, примерно в 5—8 раз. По мере разгона ротора пусковые токи уменьшаются до номинального значения при

номинальной нагрузке. Эти токи не опасны для двигателя, так как они кратковременны, их продолжительность 1—2 с и за это время они не успевают нагреть обмотки, но в сетях малой мощности могут вызвать падение напряжения. О способах их уменьшения см. ниже.

Электромагнитный момент асинхронного двигателя создается взаимодействием тока ротора с вращающимся магнитным полем статора.

Обмотки статора и ротора обладают активным и индуктивным сопротивлением. Однако активное и индуктивное сопротивления ротора во много раз меньше, чем аналогичные сопротивления статора (в короткозамкнутом роторе проводники замкнуты кольцами, а в статоре — катушки фаз содержат довольно значительное количество витков и обладают большим сопротивлением). Поэтому в электрических машинах применяют такой прием: все электрические величины ротора пересчитывают (приводят) к аналогичным величинам статора, т.е. обмотку ротора с числом фаз m_2, обмоточным коэффициентом $k_{об2}$ и числом витков одной фазной обмотки w_2 приравнивают к таким же величинам обмотки статора. Приведенные (пересчитанные) величины обозначают штрихом, например, U'_2, I'_2 и т.д. Кроме того, статор и ротор разделены воздушным зазором, который обладает значительным магнитным сопротивлением. Так как магнитный поток создается индуктивным током, то указанное сопротивление — индуктивное. Но приведение параметров ротора к параметрам статора не должно отразиться на его энергетических параметрах: все мощности, фазовые сдвиги векторов ЭДС и токов ротора должны оставаться такими же, как и в реальном асинхронном двигателе.

Для вывода уравнения механической характеристики рассмотрим баланс мощности в двигателе. Электромагнитная мощность $P_{эм}$, передаваемая ротору от статора вращающимся магнитным полем, определяется электромагнитным моментом M, развиваемым двигателем и равна

$$P_{эм} = M\omega = \frac{Mn}{9,55}. \qquad (3.17)$$

Мощность, передаваемая ротору, можно разделить на две составляющие: мощность, преобразуемую в механическую $P_м$ и мощность потерь $P_{эл2}$ в роторе.

Первая составляющая: $P_м = M_2\omega_2$.

Вторая составляющая представляет собой электрические потери в обмотках ротора и потери на перемагничивание ротора. Как правило, потери в стали ротора значительно меньше электрических потерь, в связи с чем первыми можно пренебречь. Тогда

$$P_{эм} = P_м + \Delta P_{эл2}$$

или

$$M\omega_1 = M\omega_2 + \Delta P_{эл2},$$

отсюда

$$\Delta P_{эл2} = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1 S.$$

Учитывая, что

$$P_{эл2} = m(I'_2)^2 R'_{2п},$$

где m — число фаз;

$$\text{и } R'_{2п} = R'_2 + R'_п,$$

можно записать выражение для момента

$$M = \frac{m\left(I'_2\right)^2 R'_{2п}}{\omega S} = \frac{m_1\left(I'_2\right)^2 R'_{2п} p}{2\pi f_1 S}. \qquad (3.18)$$

Величина тока

$$I'_2 = \frac{U_ф}{\sqrt{\left(R'_2 + R'_1\right) + \left(x_1 + x'_2\right)}}.$$

Подставив значение тока I'_2 в формулу момента M, получим

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r'_2 p}{2\pi f_1 s}\left[\left(\frac{r_1 + r'_2}{s}\right)^2 + \left(x_1 + x'_2\right)^2\right], \qquad (3.19)$$

где m_1 — число фаз обмотки статора;
U_1^2 — напряжение, подаваемое на обмотку статора;
r'_2 — приведенное активное сопротивление обмотки ротора;
p — число пар полюсов обмотки статора;
f_1 — частота питающего напряжения;
s — скольжение;
r_1 — активное сопротивление обмотки статора;
x_1 — реактивное сопротивление обмотки статора;
x'_2 — реактивное сопротивление обмотки ротора.

Из этой формулы следует

$$M \equiv U_1^2. \tag{3.20}$$

Таким образом, уменьшение напряжения в 3 раза вызывает уменьшение электромагнитного момента в 9 раз. Для асинхронного двигателя опасно понижение питающего напряжения, так как это может вызвать его остановку — режим короткого замыкания.

Для нахождения максимума функции продифференцируем выражение (3.19) и приравняем его к нулю $dM/ds = 0$.

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 \left[\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2} \right]}; \tag{3.21}$$

$$S_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}}. \tag{3.22}$$

На основании формул (3.19), (3.21), (3.22) можно построить механическую характеристику (рис. 3.14). Хотя полученное выражение имеет знаки «±», для двигательного режима поставим знак «+»,

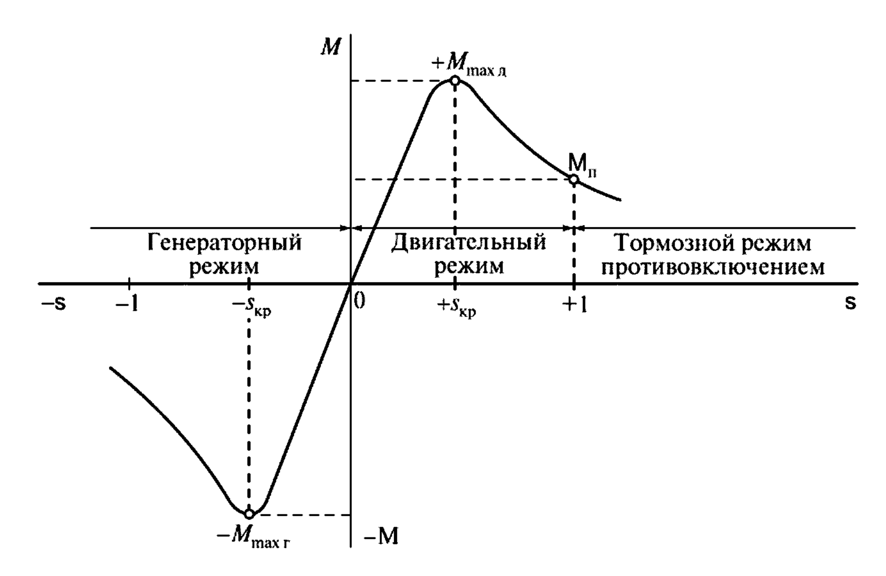


Рис. 3.14. Механическая характеристика асинхронной машины

так как генераторный режим в ТПС практически не применяется. При скольжении $S = 1$ ротор асинхронного двигателя находится в неподвижном состоянии: $n_2 = 0$. Если в формулу (3.19) подставить $S = 1$, то получим значение пускового момента $M_п$

$$M_п = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1}\left[\left(r_1 + r_2'\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2\right]. \qquad (3.23)$$

Под действием этого момента начинается вращения ротора двигателя, а скольжение уменьшается, причем вращающий момент вначале увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается до установившегося значения (рис. 3.15):

$$M = M_т + M_0, \qquad (3.24)$$

где $M_т$ — тормозной противодействующий момент, создаваемый рабочим органом;

M_0 — момент холостого хода, преодолевающий момент трения $M_{тр}$. $M_{тр}$ создается силами трения в подшипниках двигателя и силами на преодоление вентиляционного момента $M_{вент}$, необходимого для вращения вентилятора, который расположен на валу двигателя. Вследствие этого полезный момент двигателя, необходимый для привода рабочего органа механизма или машины, всегда меньше электромагнитного момента

$$M_2 = M - M_0 = M_с.$$

Рабочим органом является любое устройство (компрессор, вентилятор и др.), которое асинхронный двигатель приводит во вращение. При изменении $M_т$ на такую же величину изменяется электромагнитный момент M на участке OA механической характеристики. Участок OA называют рабочим участком. Если $M_т$ превысит величину OA, то равенство моментов нарушится и частота вращения ротора начинает убывать до 0.

При пуске в ход необходимо, чтобы $M_п > M_т$, в противном случае пуск двигателя не произойдет.

Отношение моментов $M_п/M_{ном} = k_{пм}$ называют кратностью пускового момента. Для дви-

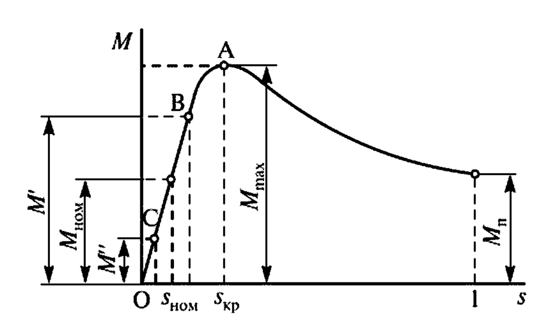


Рис. 3.15. Механическая характеристика асинхронного двигателя

гателей с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6—100 кВт действующим ГОСТом установлено, что коэффициент кратности должен быть $k_{пм}$= 1,0—2,0; а мощностью 100—1000 кВт — $k_{пм}$= 0,7—1,0.

Для *реверсирования асинхронного двигателя* достаточно поменять местами любые два провода из трех подводящих питание к асинхронному двигателю.

Рабочие характеристики представляют собой зависимость частоты вращения n_2, КПД η, полезного момента M_2, коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при U_1 = const и f_1 = const.

Скоростная характеристика определяется выражением

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p}(1 - S), \qquad (3.25)$$

где n_2 — частота вращения ротора;

p — число пар полюсов;

S — скольжение.

Скольжение S будет равно

$$S = \frac{P_{э2}}{P_{эм}}, \qquad (3.26)$$

где $P_{э2}$ — электрические потери в роторе.

Так как электрические потери в роторе в режиме холостого хода ничтожно малы, то можно принять $P_{э2}$ = 0, поэтому скольжение в режиме холостого хода также ничтожно мало. По мере увеличения нагрузки выражение (3.26) увеличивается. Поэтому зависимость $n_2 = f(P_2)$ представляет собой кривую с небольшим наклоном к оси абсцисс.

Зависимость *полезного момента* M_2 от полезной мощности P_2 определяется выражением

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega_2} = \frac{60 P_2}{2\pi n_2} = \frac{9{,}55 P_2}{n_2}. \qquad (3.27)$$

Из выражения (3.27) видно, что с увеличением P_2 частота вращения уменьшается, следовательно, зависимость $M_2 = f(P_2)$ имеет несколько криволинейный вид (рис. 3.16).

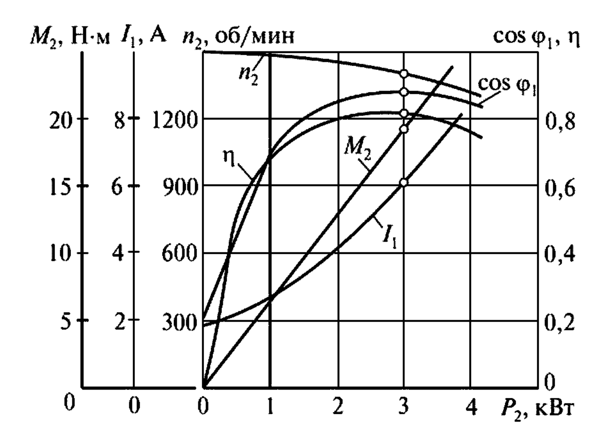


Рис. 3.16. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Коэффициент мощности $\cos\varphi_1$. Реактивная составляющая тока, как указывалось выше, создает основной магнитный поток и поэтому при возрастании тока нагрузки она практически не изменяется; возрастает только активная составляющая тока (рис. 3.17). $\cos\varphi_1$ при холостом ходе не превышает 0,2. Асинхронные двигатели проектируют таким образом, чтобы максимум $\cos\varphi_1$ (обычно 0,8—0,9) соответствовал номинальной нагрузке. Поэтому для получения максимального $\cos\varphi_1$ необходимо асинхронный двигатель использовать на полную мощность. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением $\cos\varphi_1$, так как увеличивается индуктивное сопротивление ротора (x_2S) вследствие увеличения скольжения и частоты тока в роторе.

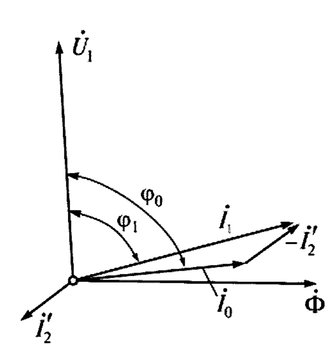


Рис. 3.17. Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Из формулы $P_2 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$ найдем величину тока

$$I_1 = \frac{P_2}{3U_1 \cos\varphi_1}.$$

При увеличении мощности P_2 величина тока I_1 увеличивается, напряжение считаем неизменным, а $\cos\varphi_1$, как было доказано выше, увеличивается. Ток I_1 начинается не с нуля, а с некоторого зна-

чения, так как при холостом ходе $P_2 = 0$ двигатель потребляет некоторую величину тока.

КПД $\eta = P_2/P_1$. При этом $P_2 = P_1 - \Delta P$, где ΔP — потери энергии в двигателе, которые состоят из механических, магнитных, электрических и добавочных потерь. С увеличением тока электрические потери $P_{эл} = I_1^2 r_1$ увеличиваются в квадратичной зависимости. Поэтому КПД вначале возрастает и достигает максимума, а затем из-за чрезмерного возрастания электрических потерь уменьшается.

Асинхронные двигатели проектируют таким образом, чтобы при номинальной нагрузке КПД и $\cos\varphi_1$ достигали максимального значения.

Пуск асинхронных двигателей. Как указывалось выше, пусковые токи не опасны для асинхронных двигателей, так как они кратковременны (составляют 1—2 с) и не успевают нагреть обмотки. Однако пусковые токи могут вызвать падение напряжения в сети. Поэтому в асинхронных двигателях мощностью свыше 38—50 кВт применяют устройства, ограничивающие пусковые токи.

При пуске трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором практически используют следующие способы пуска:

– непосредственное прямое включение в сеть;

– понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске;

– подключение к обмотке ротора пускового реостата (для асинхронного двигателя с фазным ротором).

Прямое включение в сеть (рис. 3.18) применяют для пуска в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Если при пуске $M_п < M_{ст}$ (где $M_{ст}$ — статический (тормозной) момент, приложенный к валу электродвигателя), то двигатель разогнаться не сможет. Отношение моментов

$$\frac{M_п}{M_{ном}} = K_{пм} \qquad (3.28)$$

называют кратностью пускового момента. Для двигателей с короткозамкнутым ротором

C2
C1
C3

Рис. 3.18. Схема прямого включения в сеть трехфазного асинхронного двигателя

мощностью 0,6—100 кВт стандартами установлено значение $K_{пм}$ = = 1,0—2,0; мощностью 100—1000 кВт — $K_{пм}$ = 0,7—1,0. Увеличивать кратность пускового момента больше, чем регламентировано стандартами, нежелательно, так как связано с увеличением активного сопротивления ротора, что ухудшает энергетические показатели асинхронного двигателя.

Пусковой ток двигателя при прямом включении в сеть составляет $I_п = (4 - 7)I_{ном}$.

Понижение напряжения при пуске асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором может осуществляться следующими способами:

– посредством трехфазного автотрансформатора;
– включением в цепь статора индуктивных сопротивлений;
– переключением обмоток статора со «звезды» на «треугольник».

Однако, как указывалось выше, пусковой момент понижается пропорционально квадрату напряжения, поэтому все эти способы применимы, если возможен пуск двигателя на холостом ходу или под неполной нагрузкой.

Реакторный пуск (рис. 3.19, *а*) уменьшает величину подаваемого напряжения на двигатель *1*. Сначала при разомкнутом рубильнике *4* включают рубильник *3*. При этом ток из сети поступает на обмотку статора через реактор *2*. Так как реактор обладает индуктивным сопротивлением, то на нем образуется падение напряже-

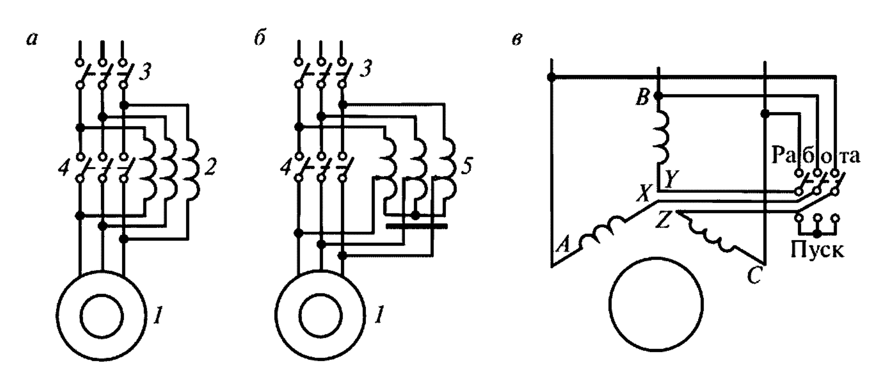


Рис. 3.19. Понижение напряжения при пуске трехфазного асинхронного двигателя:

а — индуктивным сопротивлением; *б* — автотрансформатором; *в* — переключением обмоток статора со «звезды» на «треугольник»

ния и на асинхронный двигатель будет поступать пониженное напряжение. После разгона ротора двигателя включают рубильник *4*, и на двигатель будет поступать номинальное напряжение.

Понижение напряжения автотрансформатором (рис. 3.19, *б*) осуществляют следующим образом. Вначале при разомкнутом рубильнике *4* замыкают рубильник *3*, а движок автотрансформатора *5* устанавливают в положение, обеспечивающее понижение напряжении до требуемого значения. По мере разгона ротора автотрансформатором увеличивают величину напряжения. При достижении величины номинального напряжения на двигателе замыкают рубильник *4*. Применение автотрансформатора позволяет получить бóльшую величину пускового момента, чем в случае индуктивного сопротивления при одинаковых токах на линии. Если ориентироваться на обычное значение отношения $I_п/I_н$ = 2—2,5 раза, то при понижении напряжения автотрансформатором требуется только 1,5—2 раза, а это приводит к уменьшению пускового момента в 2—4 раза. Однако недостатком этого способа является высокая стоимость аппаратуры.

При пуске двигателя *переключением обмотки статора со «звезды» на «треугольник»* (рис. 3.19, *в*) переключатель ставят в положение «пуск», что соответствует соединению обмоток «звездой». В этом положении фазное напряжение на статоре понижается в $\sqrt{3}$ раз. И во столько же раз понижается величина тока в фазных обмотках. При достижении ротором номинальной частоты вращения переключатель переводят в положение «работа», что соответствует положению «треугольник», чем и заканчивается пусковая операция.

При соединении обмоток статора «звездой» линейный ток равен фазному, а при соединении «треугольником» — больше фазного в $\sqrt{3}$ раз. Таким образом, пуск переключением обмоток статора со «звезды» на «треугольник» вызывает уменьшение величины линейного тока в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза.

Пуск трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором. При включении в цепь ротора пускового реостата увеличивается его активное сопротивление, вследствие чего уменьшается величина тока, протекающего по его обмоткам. Пусковые реостаты могут быть жидкостными, чугунными и проволочными. Жидкостные реостаты представляют собой сосуд с электролитом (в качестве электролита применяют водный раствор соды или поваренной соли); со-

противление такого реостата регулируется путем изменения погружения электродов. Металлические реостаты выполняются, как правило, ступенчатыми.

Для пуска асинхронных двигателей малой и большой мощности, как правило, применяют металлические реостаты, причем чаще всего с масляным охлаждением, для двигателей большой мощности — водяные реостаты с подвижными электродами.

Сопротивление фазы ротора складывается из сопротивления обмотки ротора $R_{2н}$ и сопротивления пускового реостата $R_{2п}$:

$$R_{2н} + R_{2п} = R_2. \qquad (3.29)$$

Начальный пусковой ток равен

$$I \approx \frac{U_1}{\sqrt{(R_{2н} + R_2)^2 + X_2^2}}. \qquad (3.30)$$

Начальный пусковой момент (3.23) будет максимален, если критическое скольжение будет равно

$$S_m = \frac{R_2'}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = 1. \qquad (3.31)$$

Обычно пусковой реостат имеет 3—6 ступеней, что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение пускового момента в процессе разгона двигателя. В процессе пуска поочередно включают контакторы К3, К2, К1 (рис. 3.20, *а*). В начале пуска двигатель работает на характеристике *4* (рис. 3.20, *б*), соответствующей сопротивлению пускового реостата $r_{доб2} + r_{доб1} + r_{доб3}$, и развивает вращающий момент $M_{п\,max}$. По мере увеличения частоты вращения ротора скольжение и вращающий момент M уменьшаются. При некотором значении сопротивления пускового реостата момент станет $M_{п\,min}$. Поэтому часть $r_{доб2} + r_{доб1}$ выводят, замыкая контактор К2, затем К1. Вращающий момент мгновенно возрастает до $M_{п\,max}$, а затем с увеличением частоты вращения изменяется по характеристике *3*, а затем по *2*. После этого замыкают контакторы К1 и двигатель работает по характеристике *1*.

Пусковые характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором наиболее благоприятны, так как наибольшие значения

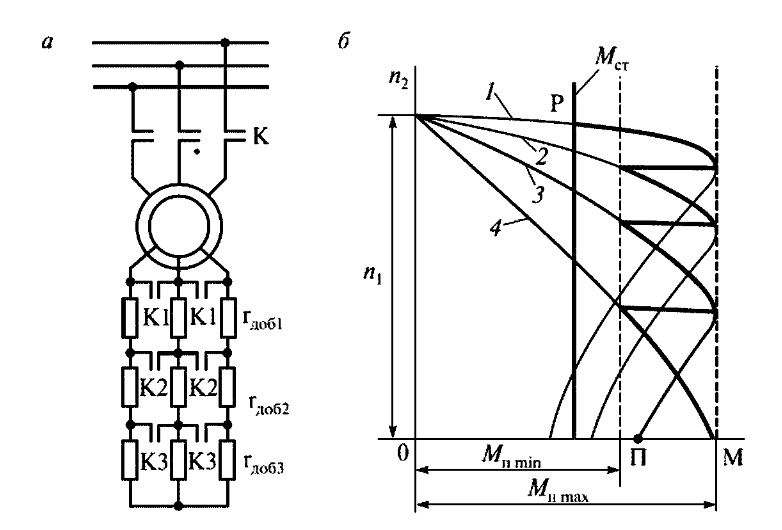


Рис. 3.20. Пуск трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором: *а* — схема включения; *б* — пусковые характеристики; *1* — естественная характеристика; *2*, *3*, *4* — характеристики при включении активного сопротивления в цепь ротора

пусковых моментов достигаются при невысоких значениях пусковых токов.

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя. Из формулы (3.25) следует, что частоту вращения ротора асинхронного двигателя можно регулировать

– изменением частоты вращения вращающегося магнитного поля статора n_1 либо изменением числа пар полюсов p;

– изменением скольжения двигателя S.

Регулирование частоты вращения изменением частоты. В асинхронных тяговых электродвигателях применяют первый способ — изменение частоты f питающего напряжения.

В тяговых электродвигателях при эксплуатации требуется изменять частоту вращения и величину электромагнитного момента в широких пределах. На рис. 3.21 приведена требуемая механическая характеристика. На начальном участке механической характеристики, т.е. в период разгона ЭПС от $n = 0$ до $n_{ном}$ необходимо поддерживать постоянный момент. После этого при изменении частоты вращения от $n_{ном}$ до n_{max} следует использовать ТЭД на

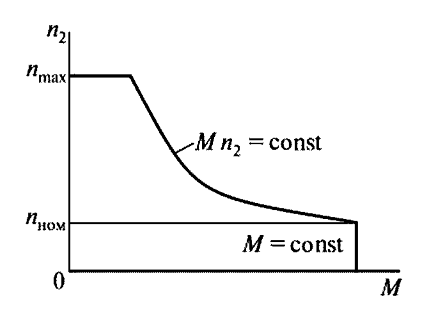


Рис. 3.21. Требуемая механическая характеристика для тягового трехфазного асинхронного электродвигателя

полную мощность, т.е. постепенно уменьшать момент двигателя с ростом частоты вращения, выполняя условие $M \cdot n = \text{const}$.

Для получения требуемой характеристики необходимо изменять не только частоту питающего напряжения, но и величину напряжения.

В 1925 г. академиком М.П. Костенко был сформулирован закон управления асинхронными двигателями при изменении частоты тока:

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M_{ст2}}{M_{ст1}}}. \tag{3.32}$$

При $M_{ст} = \text{const}$ уравнение (3.32) принимает вид

$$\frac{U_{1ном}}{f_{1ном}} = \frac{U_2}{f_2} = \text{const}, \tag{3.33}$$

где индексы 1 и 2 относятся к различным частотам питающего напряжения, т.е. к различным частотам вращения.

Следовательно, питающее напряжение следует изменять прямо пропорционально его частоте. При этом мощность двигателя увеличивается прямо пропорционально возрастанию частоты вращения.

При необходимости поддерживают постоянной мощность электродвигателя $P = M\omega = \text{const}$, а так как частота вращения пропорциональна частоте f_1, то получим уравнение

$$M_{1ном} f_{1ном} = M f_1 = \text{const}. \tag{3.34}$$

Таким образом, асинхронный двигатель может быть использован в качестве тягового электродвигателя на тепловозах с электрической передачей.

Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов p применяют реже, так как p может быть только целым числом, то данный способ обеспечивает только ступенчатое регулирование частоты вращения. Так при частоте тока 50 Гц и p = 1—4 пар по-

люсов можно получить следующие синхронные частоты вращения: 3000, 1500, 1000, 750 об/мин.

Для изменения числа пар полюсов необходимо, чтобы в пазы статора были уложены независимые обмотки с различными значениями p, либо при одной обмотке статора имелась бы возможность изменения ее схемы соединений. В первом случае заметно увеличиваются габариты и массы двигателей, но при этом возможно практически любое соотношение чисел пар полюсов обмоток. Как правило, такие двигатели выполняются с двумя обмотками с соотношением чисел пар полюсов от 3:1 до 12:1.

Переключение обмоток статора с четырехполюсной в двухполюсную показано на рис. 3.22. Две последовательно соединенные катушки образуют четыре полюса (рис. 3.22, *а*), а если катушки соединить последовательно, но встречно, то получим два полюса (рис. 3.22, *б*). При параллельном соединении катушек (рис. 3.22, *в*) — тоже получим два полюса. В обоих случаях частота вращения одинакова, однако условия работы двигателя и его характеристики различны.

Регулирование частоты вращения изменением напряжения U. При изменении подводимого напряжения к двигателю изменяется электромагнитный момент двигателя пропорционально U^2 и соответственно изменяются механические характеристики (рис. 3.23, *а*), в результате чего изменяются также значения рабочих скольжений $S_{\min}$ и $S_{\max}$ при одном и том же статическом моменте сопротивления $M_{\text{ст}}$. Диапазон регулирования частоты вращения ограничен значением критического скольжения и возможной утратой двигателя перегрузочной способности, которая пропорциональна квадрату напряжения сети. Подводимое напряжение чаще всего регулируют автотрансформатором, иногда реактором.

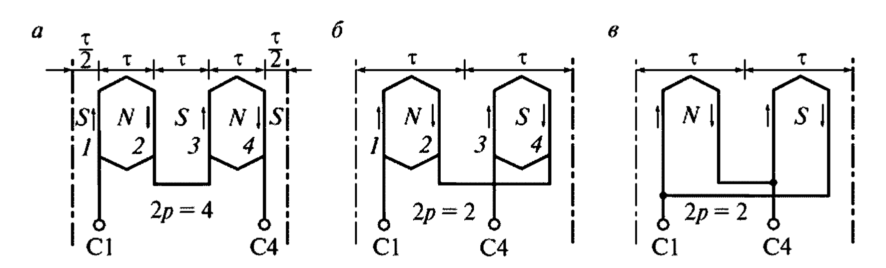


Рис. 3.22. Схемы переключения обмоток статора на разное число пар полюсов

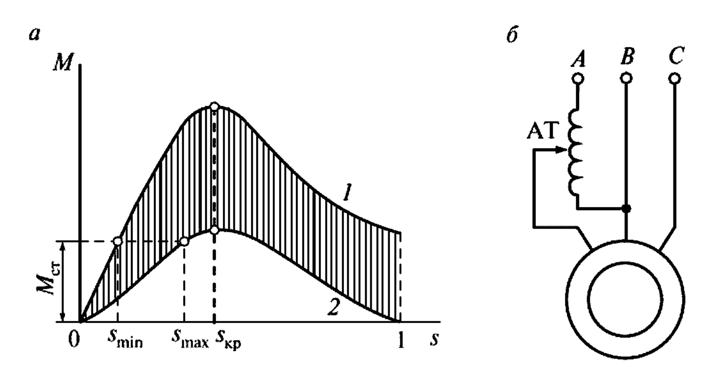


Рис. 3.23. Механические характеристики (*а*) и схема включения асинхронного двигателя (*б*) при изменении симметрии подаваемого напряжения

При нарушении симметрии подводимого трехфазного напряжения (рис. 3.23, *б*) к двигателю вращающееся магнитное поле статора становится эллиптическим, при этом поле приобретает обратную составляющую (встречное поле), которая создает момент $M_{обр}$, направленный встречно вращающемуся моменту M. Это приводит к уменьшению результирующего вращающегося момента. Недостатком этого способа регулирования частоты вращения является узкая зона регулирования и несимметрия напряжения.

Регулировать частоту вращения путем изменения напряжения питания можно с помощью *автотрансформатора* АТ (рис. 3.24, *а*), который включен в линейные провода между сетью и обмоткой ста-

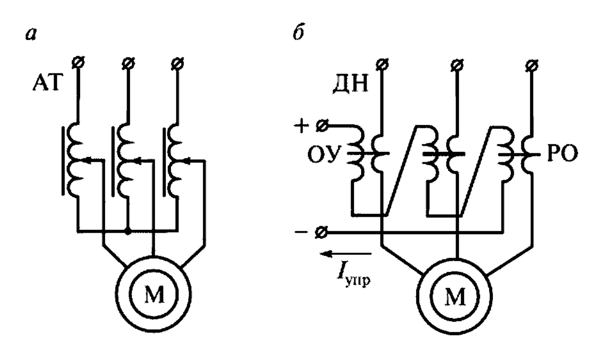


Рис. 3.24. Регулирование частоты вращения ротора при изменении питающего напряжения:

а — регулировочным автотрансформатором; *б* — дросселем насыщения

тора, а также с помощью *дросселя насыщения* ДН (рис. 3.24, *б*). Рабочие обмотки РО дросселя создают в цепи питания двигателя индуктивное сопротивление, благодаря которому уменьшается величина напряжения, подводимого к двигателю. В то же время с уменьшением тока в обмотке управления ОУ сопротивление дросселей возрастает, что приводит к снижению напряжения на двигателе и, следовательно, к уменьшению частоты вращения.

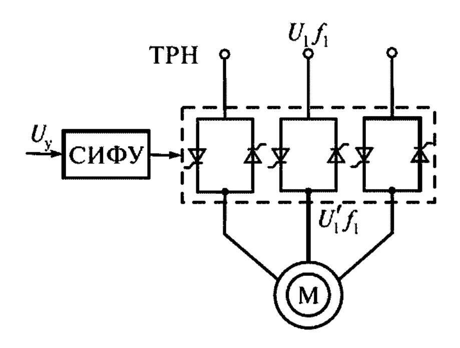


Рис. 3.25. Тиристорный регулятор напряжения

Тиристорным регулятором напряжения ТРН (рис. 3.25) можно изменять величину напряжения подводимого к двигателю при неизменной частоте f тока. Управление осуществляется блоком системы импульсно-фазового управления (СИФУ). При такой системе управления не требуется контакторов, включающих асинхронный двигатель, все эти функции выполняет ТРН.

3.4. Синхронные машины

Назначение. Синхронные машины, как и все электрические машины, являются обратимыми, т.е. они могут работать в режиме генератора и в режиме двигателя. Практически почти все генераторы переменного трехфазного тока, устанавливаемые на тепловых, атомных и гидравлических электростанциях, являются синхронными. Мощность современных синхронных генераторов достигает 1500 МВ·А. Синхронные двигатели применяются в устройствах, где требуется постоянная частота вращения. Частота вращения ротора синхронных двигателей является постоянной и не зависит от нагрузки.

На ТПС синхронные генераторы применяют в качестве тяговых генераторов на тепловозах с переменно-постоянной и переменно-переменной передачами. Тяговые синхронные генераторы тепловозов приводятся во вращение дизелем, а выработанная ими электроэнергия потребляется тяговыми электродвигателями.

Важной особенностью синхронных машин является их способность работать с $\cos \varphi = 1$ и даже с опережающим $\cos \varphi$. Это поз-

воляет компенсировать реактивные (индуктивные) токи не только от самой синхронной машины, но и от других потребителей энергии, например, от асинхронных двигателей.

Устройство. В синхронных машинах якорь может быть неподвижным или вращающимся. Машины большой и средней мощности (рис. 3.26) выполняют с неподвижным якорем для удобства отвода электрической энергии от обмотки якоря или ее подвода к ней. Так как мощность возбуждения невелика, то обмотки возбуждения *3* с сердечниками полюсов *4* проще расположить на роторе. Ток возбуждения подают посредством щеток, которые помещены в щеткодержатели *2* и контактируют с контактными кольцами *1*. В сердечнике статора *5* выполнены пазы, куда уложена трехфазная обмотка. На валу *7* ротора расположен вентилятор *6*.

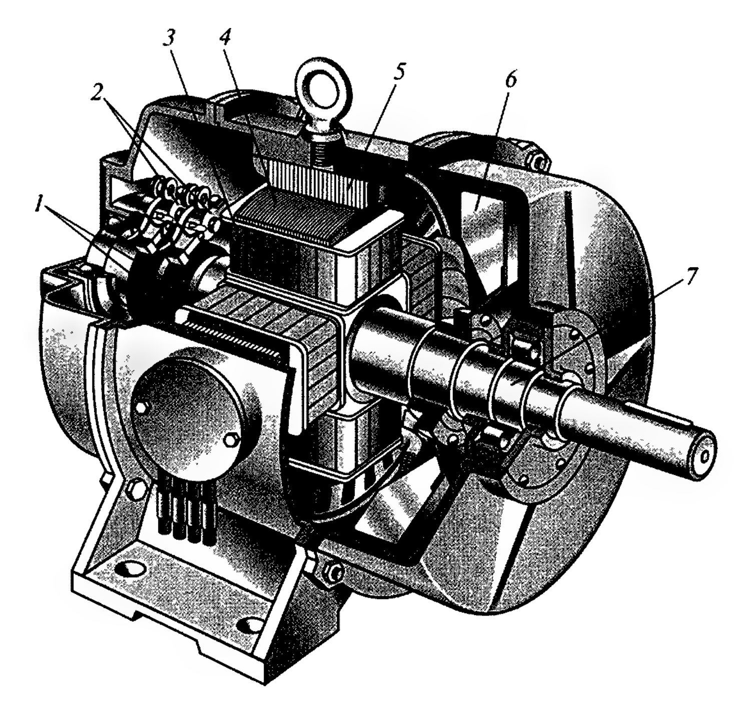


Рис. 3.26. Синхронный генератор:
1 — контактные кольца; *2* — щеткодержатели; *3* — обмотка возбуждения; *4* — полюсный наконечник; *5* — сердечник статора; *6* — вентилятор; *7* — вал

В машинах с неподвижным якорем применяют две различные конструкции ротора: явнополюсные (рис. 3.27, *а*) и неявнополюсные (рис. 3.27, *б*). Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя и большим числом полюсов. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде цилиндрических катушек *3*, которые размещены на сердечнике *1*. Все полюса ротора размещены на ободе *4*, являющемся также и ярмом магнитной системы машины, в котором замыкаются магнитные потоки полюсов. Явнополюсные роторы применяют в тяговых генераторах тепловозов.

Неявнополюсные роторы применяют в быстроходных генераторах, таких как турбогенераторы. Для получения стандартной частоты 50 Гц при двух полюсах они должны иметь 3000 об/мин, а при четырех — 1500 об/мин.

Принцип действия. Ток возбуждения, протекающий по обмоткам главных полюсов ротора, создает основной магнитный поток Ф. При вращении ротора с частотой вращения n_1 его магнитный поток Ф будет пересекать проводники статора и индуктировать в них ЭДС. Так как обмотки статора расположены под углом 120° друг к другу, то частота тока в статоре составит

$$f_1 = \frac{pn_1}{60}. \qquad (3.35)$$

Если к обмоткам статора подключить симметричную нагрузку $Z_н$, то возникает симметричная система токов, которая вызовет появление вращающегося магнитного поля.

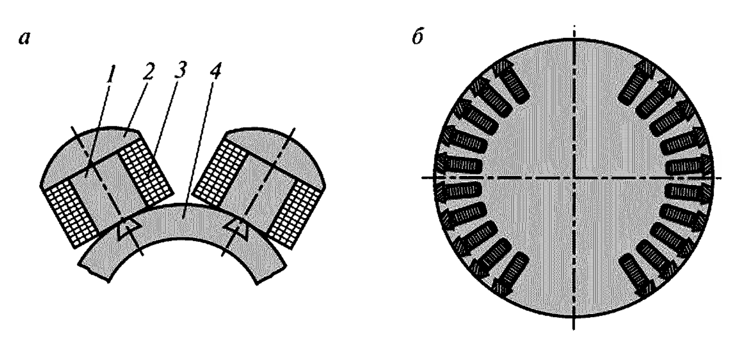
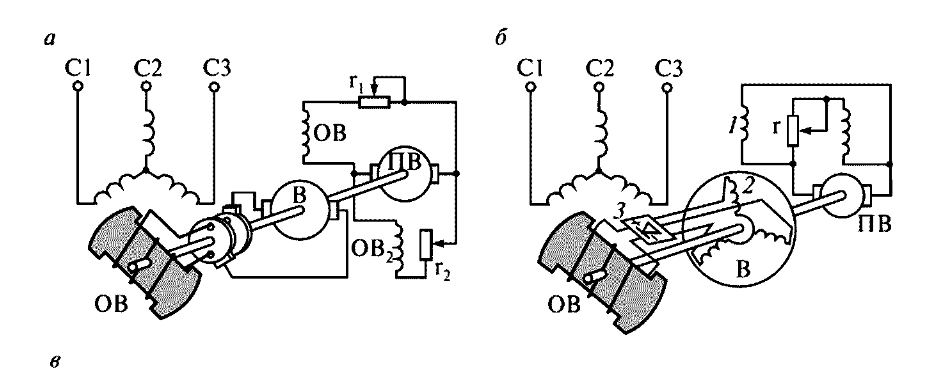


Рис. 3.27. Конструкция роторов синхронных машин:
1 — сердечник полюса; *2* — полюсный наконечник; *3* — обмотка возбуждения; *4* — обод

Способы возбуждения. Для возбуждения синхронных машин необходимо к кольцам, расположенным на роторе, подключить источник постоянного тока. В системе электромагнитного возбуждения источником постоянного тока является возбудитель — генератор постоянного тока независимого или параллельного возбуждения. Возбудитель вырабатывает постоянный ток, который через щетки и контактные кольца подается на обмотки возбуждения полюсов, расположенные на роторе синхронной машины. Чаще всего вал синхронной машины и вал возбудителя соединены между собой.

В крупных синхронных машинах применяют *возбудители и подвозбудители* (рис. 3.28, *а*). В качестве возбудителя используют генератор постоянного тока независимого возбуждения. Для питания его обмоток возбуждения применяют генератор постоянного тока — подвозбудитель. Все три машины — синхронный генератор, возбудитель В и подвозбудитель ПВ располагают на одном валу. Нагрузкой подвозбудителя является обмотка возбуждения ОВ



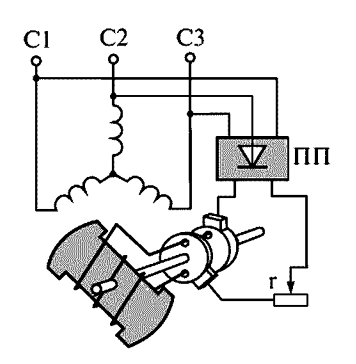


Рис. 3.28. Схемы возбуждения синхронных машин:
а — электромашинный; *б* — бесконтактный; *в* — самовозбуждение; *1* — обмотка возбуждения полюсов; *2* — якорь возбудителя; *3* — выпрямитель

возбудителя, а возбудитель питает обмотку возбуждения синхронного генератора. Для регулирования тока возбуждения применяют регулировочные реостаты (r_1) возбудителя и подвозбудителя (r_2).

В настоящее время широкое распространение получила *система бесконтактного возбуждения*, при которой выпрямитель закреплен на валу синхронного генератора и вращается вместе с ним. В этом случае не требуется контактных колец и щеток (рис. 3.28, *б*). В этой системе в качестве возбудителя применен синхронный генератор с трехфазным якорем *2*, расположенном на роторе, а обмотка возбуждения *1* полюсов находится на статоре и получает питание от подвозбудителя ПВ — генератора постоянного тока параллельного возбуждения. Так как возбудитель является генератором переменного тока, а обмотку возбуждения синхронного генератора необходимо питать постоянным током, то на выходе обмотки якоря возбудителя включен полупроводниковый преобразователь *3*, закрепленный на валу синхронной машины и вращающийся вместе с обмоткой возбуждения синхронного генератора. В такой системе возбуждения отсутствует скользящий контакт в цепи возбуждения синхронной машины, что позволяет повысить ее надежность и увеличить КПД.

При *самовозбуждении* (рис. 3.28, *в*) часть мощности, необходимой для возбуждения, отбирается от обмотки статора этого же генератора и через понижающий трансформатор и выпрямительный полупроводниковый преобразователь (ПП) поступает через щетки и контактные кольца к обмотке возбуждения синхронного генератора.

На возбуждение синхронных машин затрачивается мощность, составляющая от 0,2 до 5 % полезной мощности. В машинах малой мощности применяют принцип возбуждения постоянными магнитами, которые располагают на роторе. В этом случае конструкция машины упрощается и становится более экономичной и надежной.

Реакция якоря синхронной машины. При работе синхронной машины по обмоткам возбуждения протекает ток, создавая МДС возбуждения

$$F_d = I_в w. \tag{3.36}$$

Когда синхронная машина нагружена, то по ее обмоткам якоря с числом витков w_1 протекает ток I_1, создавая МДС якоря

$$F_{q1} = I_1 w_1. \tag{3.37}$$

МДС статора (якоря) воздействует на МДС ротора (индуктора), усиливая или ослабляя поле возбуждения или же искажая его форму.

Воздействие МДС обмотки якоря на МДС обмотки возбуждения называют *реакцией якоря.*

Нагрузка синхронного генератора, как правило, смешанная: активно-индуктивная или активно-емкостная нагрузки каждая в отдельности влияет на работу генератора.

Реакция якоря при активном токе нагрузки. На рис. 3.29, *а* представлены статор и ротор синхронного генератора. На статоре показаны три обмотки, сдвинутые на угол 120° относительно друг друга, причем каждая сторона катушки занимает только по одному пазу. Ротор явнополюсный и в данный момент времени занимает вертикальное положение. Магнитный поток ротора индуктирует ЭДС E_1 в обмотках статора. Так как нагрузка активная, то ЭДС и ток совпадают. По правилу буравчика определим направление магнитных силовых линий статора. Как видно из рис. 3.29, МДС статора и ротора направлены под углом 90° друг к другу, т.е. поперек. Поэтому реакция якоря считается поперечной.

Построим ниже векторную диаграмму. Вектор F_d направим вертикально, как расположен ротор. От него под углом 90° в сторону отставания проводим вектор ЭДС статора. При активной нагрузке

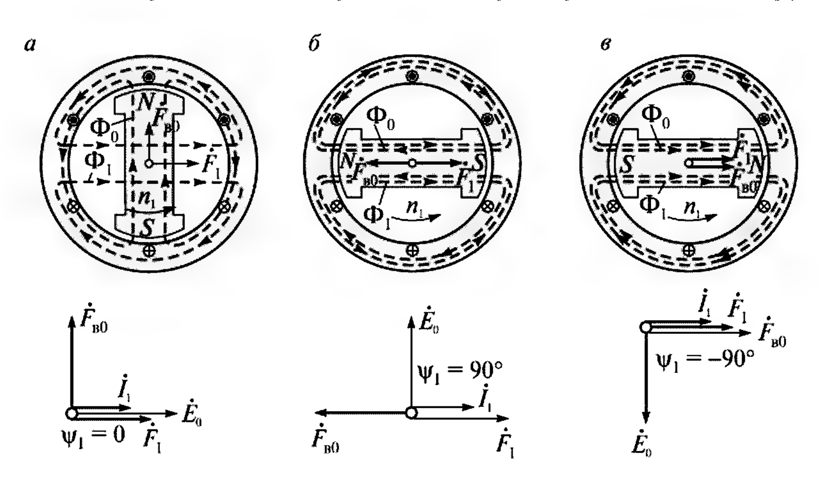


Рис. 3.29. Реакция якоря синхронной машины и векторные диаграммы при активной (*а*), индуктивной (*б*) и емкостной (*в*) нагрузке

с вектором ЭДС совпадает ток I_1 статора, который создает МДС статора F_{q1}, совпадающий с этим током.

При поперечной реакции якоря МДС статора, воздействуя на МДС ротора, искажает результирующее магнитное поле машины: под набегающим краем полюса поле ослабляется (магнитные силовые линии статора и ротора совпадают). Размагничивание участков зубцового слоя статора происходит беспрепятственно, а намагничивание зубцовых слоев статора и полюсных наконечников ограничивается магнитным насыщением. В итоге результирующий магнитный поток Ф уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС машины E_1.

Реакция якоря при индуктивном токе нагрузки. При индуктивном токе нагрузки ЭДС статора E_1 опережает ток I_1 на угол 90°. Следовательно, ток достигает максимального значения после поворота ротора вперед на 90° относительно его положения, которое соответствовало максимуму ЭДС (рис. 3.29, *б*). МДС F_{q1} статора и МДС F_d ротора направлены встречно. Этот же результат мы получим, построив векторную диаграмму. Из диаграммы видно, что векторы МДС направлены встречно. Таким образом, при индуктивном токе нагрузки синхронного генератора реакция якоря продольная, размагничивающая.

Реакция якоря при емкостном токе нагрузки. При емкостном нагрузке ЭДС отстает от тока на угол 90°. МДС статора и ротора действуют по оси полюсов согласно рис. 3.29, *в*. Поэтому при емкостном токе нагрузки синхронного генератора реакция якоря продольная, подмагничивающая. Магнитное поле не искажается.

Смешанная нагрузка. Любой нагрузочный режим можно получить посредством векторных диаграмм, накладывая их друг на друга. При активно-индуктивной нагрузке вектор F_1 отстает по фазе от вектора $\dot{E}_0$ на угол $0 < \psi < 90°$. Разложим вектор F_1 на две составляющие: продольную составляющую МДС $F_{q1} = F_1 \cos \psi_1$.Такое же разложение МДС якоря F_1 на составляющие можно сделать и в случае активно-емкостной нагрузки. Поперечная составляющая МДС статора F_{q1}, представляющая собой МДС реакции якоря по поперечной оси, пропорциональна активной составляющей тока нагрузки $I_q = I_1 \cos \psi_1$, т.е. $F_{q1} = F_1 \cos \psi_1$, а продольная составляющая МДС статора $F_{1d} = F_1 \sin \psi_1$.

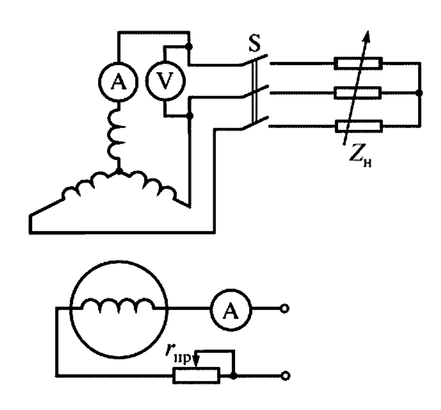


Рис. 3.30. Схема синхронного генератора при снятии его характеристик

Характеристики синхронных генераторов дают наглядное представление о ряде основных свойств синхронных генераторов. Они могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм или по данным соответствующих опытов. На рис. 3.30 показана схема синхронного генератора для снятия рабочих характеристик.

Характеристика холостого хода снимается при разомкнутом рубильнике *S*. При изменении сопротивления регулировочного реостата $r_{рг}$ изменяется величина тока возбуждения $I_в$. Это приводит к изменению МДС F_0, которая равна $F_0 = I_в w_в$; где $w_в$ — число витков обмотки возбуждения. Изменение МДС соответствует изменению магнитного потока Ф, индуктирующего ЭДС в обмотках статора. Следовательно, ЭДС E_1 будет изменяться пропорционально $I_в$ до насыщения.

С насыщением магнитопровода пропорциональность между *E* и $I_в$ нарушается (рис. 3.31, *а*). Чтобы характеристики синхронных генераторов можно было сравнить друг с другом, их строят в относительных единицах, которые помечают *: $E^* = f(r_в)$, где $E^* = E/U_{1ном}$ — относительная ЭДС фазы обмотки статора; $I_в{}^* = I_{в0}/I_{в0ном}$ — относительный ток возбуждения; $I_{в0ном}$ — ток возбуждения в режиме холостого хода, соответствующий ЭДС холостого хода $E_0 = U_{1ном}$ (см. рис. 3.1, *а*).

Внешняя характеристика $U = f(I_1)$. Для снятия этой характеристики замыкают рубильник S (см. рис. 3.30) и устанавливают номинальное напряжение $U_{1ном}$ и номинальный ток нагрузки $I_{ном}$ посредством изменения сопротивления нагрузки $Z_н$. На рис. 3.31, *б* представлены внешние характеристики, соответствующие различным по характеру нагрузкам синхронного генератора. По внешней характеристике можно судить о том, как изменится напряжение на зажимах генератора при изменении его нагрузки и отсутствии регулирования напряжения (в естественных условиях работы машины).

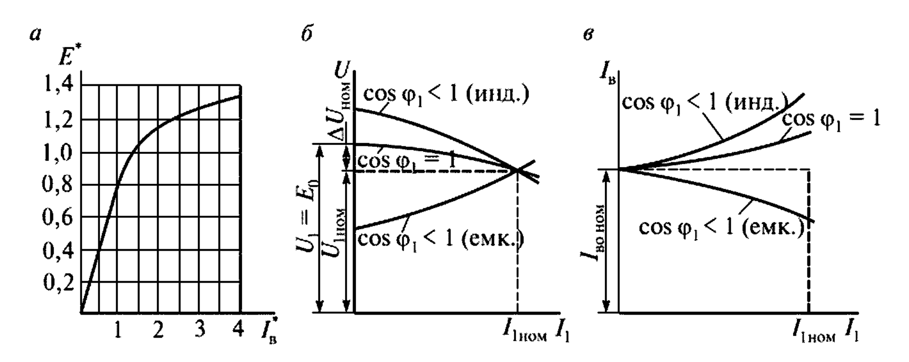


Рис. 3.31. Рабочие характеристики синхронного генератора:
а — холостого хода; *б* — внешняя; *в* — регулировочная

При активной нагрузке (cos φ = 1) при увеличении тока нагрузки напряжение уменьшается, что объясняется падением напряжения в обмотке якоря и размагничивающим действием реакции якоря. При индуктивной нагрузке (cos φ < 1 (инд.)) при увеличении тока нагрузки уменьшение напряжения объясняется продольной размагничивающей реакцией якоря. При емкостной нагрузке (cos φ < 1 (емк.)) увеличение напряжения объясняется увеличением продольной подмагничивающей реакцией якоря.

Изменение номинального напряжения в % определяется по формуле

$$U_{ном} = \frac{E_0 - U_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100\,\%.$$

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость $I_в = f(I)$ при $U = U_н$ = const; n = const; cos φ = const.

По регулировочной характеристике можно судить о том, в каких пределах необходимо изменять ток возбуждения $I_в$ при изменении тока нагрузки I, чтобы напряжение на зажимах генератора было неизменным. Регулировочные характеристики для разных значений cos φ показаны на рис. 3.31, *в*.

Особенности синхронных двигателей. Синхронный двигатель потребляет электрическую энергию из сети и преобразует ее в механическую энергию на валу двигателя. Конструктивно синхронный двигатель выполнен так же, как и синхронный генератор. Его об-

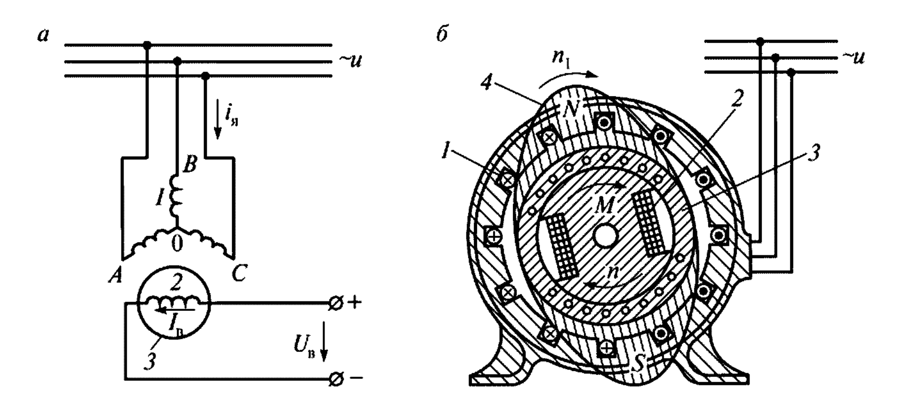


Рис. 3.32. Электрическая (*а*) и электромагнитная (*б*) схемы синхронного электродвигателя

мотка якоря *1* (рис. 3.32, *а*) подключена к источнику трехфазного тока, а обмотка возбуждения *2* получает питание постоянным током от постороннего источника. От трехфазного тока в обмотке статора создается вращающееся магнитное поле *4* (рис. 3.32, *б*), а от постоянного тока, протекающего по обмотке возбуждения, создается магнитное поле полюсов ротора. Магнитные поля статора и ротора взаимодействуют между собой, вызывая появление электромагнитного момента *М*, приводящего ротор *3* во вращение. Однако это возможно только при предварительном вращении ротора от постороннего привода.

Пусковой момент в синхронном двигателе отсутствует. Электромагнитная сила, образующаяся при взаимодействии магнитных полей статора и ротора, при частоте 50 Гц пятьдесят раз в секунду меняет свой знак, вследствие этого ротор начать вращение не может. Для устранения этого недостатка на сердечник ротора накладывают дополнительную пусковую короткозамкнутую обмотку (типа «беличье колесо»).

Схема включения синхронного двигателя при пуске показана на рис. 3.33, *а*. Обычно процесс пуска выполняют в такой последовательности:

– отключают обмотку возбуждения ротора от цепи постоянного тока;

– замыкают обмотку ротора на резистор r, сопротивление которого в 10—15 раз превышает сопротивление самой обмотки. Бла-

годаря этому уменьшается риск пробоя обмотки возбуждения при пуске и увеличивается пусковой момент;

– подключают обмотку статора к сети при отключенной механической нагрузке. Двигатель начинает вращаться как асинхронный (рис. 3.33, *б*);

– при достижении ротором частоты вращения, близкой к синхронной (обычно $n_2 = 0{,}95 n_{синхр}$), обмотку возбуждения подключают к цепи постоянного тока с помощью перекидного рубильника П;

– к валу ротора прикладывают механическую нагрузку.

Чем меньше нагрузка на валу двигателя, тем легче произвести его пуск в ход. Однако при асинхронном пуске синхронного двигателя возникают значительные пусковые токи, достигающие пяти или семикратного значения (по сравнению с номинальным током). Поэтому пуск в ход осуществляют при достаточной мощности сети или применяют способы ограничения пусковых токов, рассмотренных ранее в п. «Асинхронные двигатели».

Рабочие характеристики синхронного двигателя представляют собой зависимость частоты вращения ротора n_2, потребляемой мощ-

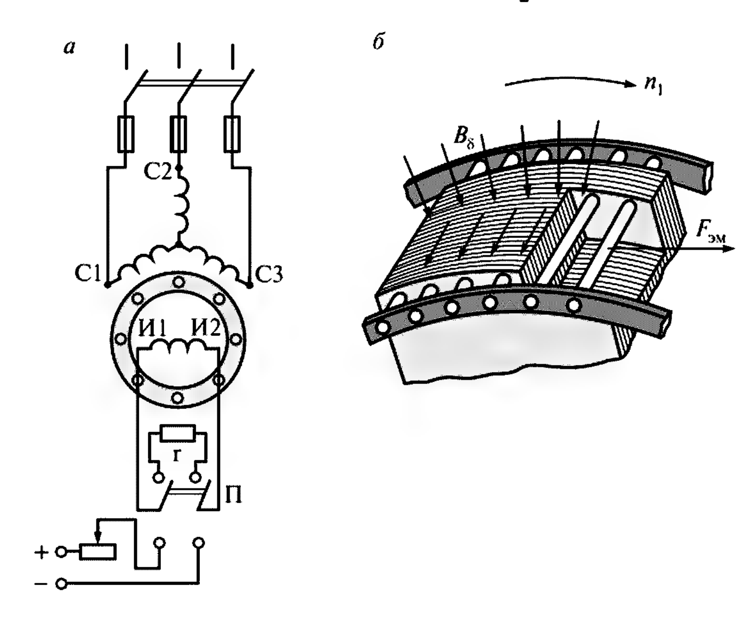


Рис. 3.33. Пуск в ход синхронного электродвигателя:
а — схема включения; *б* — пусковая асинхронная обмотка ротора

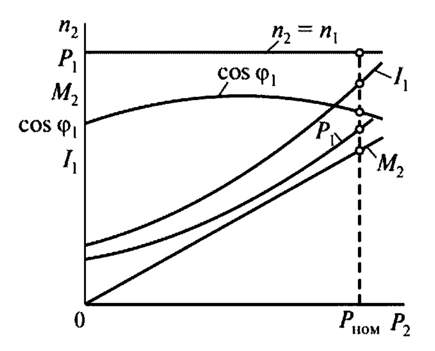


Рис. 3.34. Рабочие характеристики синхронного электродвигателя

ности P_1, полезного момента M_2, коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и тока в обмотке статора I_1 от полезной мощности двигателя P_2 (рис. 3.34).

При снятии характеристики к валу ротора прикладывают внешний тормозной момент, определяемый полезной мощностью P_2.

Частота вращения ротора n_2 всегда равна синхронной частоте вращения вращающегося магнитного поля $n_1 = 60f/p$, вследствие чего график $n_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой линии, параллельной оси абсцисс.

Зависимость коэффициента мощности $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ представляет собой кривую, зависящую от настройки тока возбуждения: если в режиме холостого хода ток возбуждения установлен таким, что $\cos\varphi_1 = 1$, то при увеличении нагрузки $\cos\varphi_1$ будет снижаться. Если же установить $\cos\varphi_1 = 1$, при номинальной нагрузке, то при недогрузке двигатель будет забирать из сети реактивный опережающий ток, а при перегрузке — отстающий. Поэтому устанавливают ток возбуждения таким, чтобы $\cos\varphi_1$ был равен единице при средней нагрузке. В этом случае при изменении нагрузки в небольших пределах $\cos\varphi_1$ останется достаточно высоким. Чаще всего устанавливают ток в обмотке возбуждения синхронного двигателя таким, чтобы $\cos\varphi_1 = 1$ был при нагрузке несколько превышающей номинальную. В этом случае при номинальной нагрузке $\cos\varphi_1 \approx 0{,}8$ синхронный двигатель будет потреблять из сети опережающий по отношению к напряжению сети ток, что приведет к повышению коэффициента мощности этой сети.

Полезный момент на валу синхронного двигателя $M_2 = P_2/\omega_1$. Так как рабочие характеристики снимают при $f_1 = \text{const}$, то график $M_2 = f(P_2)$ имеет вид прямой линии, выходящей из начала координат.

Мощность на входе двигателя $P_1 = P_2 + \sum\Delta P$. При увеличении нагрузки на валу двигателя увеличиваются также потери $\sum\Delta P$, вследствие чего потребляемая мощность растет быстрее полезной

мощности P_2 и график $P_1 = f(P_2)$ имеет несколько криволинейный вид.

Достоинства и недостатки синхронных двигателей. К достоинствам синхронных двигателей относятся: строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу; меньшая, чем у асинхронных двигателей, чувствительность к колебаниям напряжения; возможность работы при $\cos\varphi = 1$. Это приводит к улучшению коэффициента мощности сети, а также к уменьшению размеров самого двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели являются генераторами реактивной (емкостной) мощности, компенсирующей реактивную (индуктивную) мощность асинхронных двигателей, благодаря чему разгружаются линии электропередачи (ЛЭП) от реактивных токов. Это позволяет передавать по ЛЭП бóльшую активную мощность.

Недостатками синхронных двигателей являются: сложность конструкции по сравнению с асинхронными, что значительно повышает их стоимость; сравнительная сложность пуска в ход; трудности с регулированием частоты вращения. Эти недостатки тормозят их широкое применение. Однако при мощностях превышающих 100 кВт, когда очень выгодно иметь высокий $\cos\varphi$ и уменьшенные габариты машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

3.5. Тяговые генераторы переменного тока

По сравнению с генераторами постоянного тока генераторы переменного тока обладают следующими преимуществами:

– синхронные генераторы допускают более высокую частоту вращения, чем генераторы постоянного тока, так как механическая мощность, определяемая формулой

$$P = fv, \qquad (3.38)$$

где f — сила, Н, действующая на проводники ротора;

v — линейная скорость ротора, м/с,

что позволяет снизить массу дизель-генератора при одинаковой мощности и повышенной скорости;

– мощность генератора в приемлемых габаритах может быть увеличена до 7500 кВт, что позволяет снять ограничения по мощности;

— синхронные генераторы более надежны, так как в них отсутствует коллектор;

— из-за отсутствия коллектора значительно снижаются эксплуатационные затраты на содержание генератора (не требуется регулярно проводить продорожку, снимать фаски коллекторных пластин, заменять изношенные щетки и т.д.);

— уменьшается количество щеток (для сравнения: в генераторе ГП331Б десять бракетов с девятью щеткодержателями и в каждом щеткодержателе по две щетки, а в генераторе ГС-501А всего по два щеткодержателя на каждое кольцо;

— коллектор изготовляют из медных пластин, а контактные кольца — из стали. Следовательно, стоимость синхронного генератора значительно ниже коллекторного;

— обмотки якоря расположены на статоре, поэтому изоляция менее дорогая;

— мощность обмотки возбуждения синхронного генератора составляет всего 1,5 % мощности генератора;

— отсутствуют добавочные полюса с обмотками возбуждения, что также снижает стоимость генератора.

К недостаткам следует отнести отсутствие начального пускового момента синхронного генератора в режиме двигателя. Поэтому для пуска дизеля применяют специальные стартеры или стартер-генераторы — машины постоянного тока.

Синхронный генератор **ГС-501** (рис. 3.35) представляет собой электрическую машину защищенного исполнения с явно выраженными полюсами на роторе.

Технические характеристики тягового генератора ГС-501

Мощность, кВт	2800
Напряжение пониженное/повышенное, В	360/580
Ток при напряжении низшем/высшем, А	2×2400/2×1500
Ток максимальный кратковременный, А	2×3700
Частота вращения, об/мин	1000
КПД, %	95,8
Масса, кг	6000
Расход охлаждающего воздуха, $м^3/с$	4,45
Серия локомотива	2ТЭ116, ТЭП70

Корпус статора — сварной, изготовлен из толстолистовой стали. С обеих сторон корпуса приварены опорные лапы для креп-

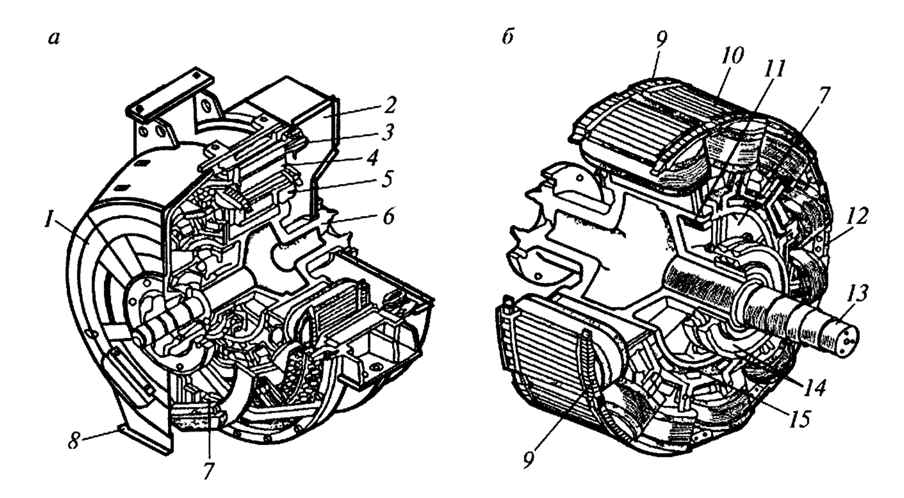


Рис. 3.35. Конструкция синхронного тягового генератора ГС-501 (*а*) и его ротора (*б*):

1 — подшипниковый щит; *2* — выходной воздушный патрубок; *3* — обмотка статора (якоря); *4* — пакет сердечника статора; *5* — обмотка возбуждения; *6* — ротор; *7* — шины; *8* — входной воздушный патрубок; *9* — демпферная обмотка; *10* — полюс; *11* — балансировочные грузы; *12* — накладка; *13* — вал; *14* — контактные кольца; *15* — барабанная втулка ротора

ления генератора на поддизельную раму. Внутри корпуса запрессован сердечник *4*, выполненный из штампованных сегментных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В листах сердечника выполнены 144 паза, куда уложена волновая двухслойная обмотка *3*. От «распушенности» зубцы сердечника предохраняются нажимными кольцами. Для охлаждения в сердечнике имеется 120 вентиляционных аксиальных канала диаметром 27 мм. Пазы выстланы стеклотканью. Катушки статора изолированы от корпуса полиамидной и активированной фторопластовой пленками.

Обмотка статора — две трехфазные «звезды», сдвинутые одна относительно другой на угол 30°. Секция обмотки прямоугольного сечения состоит из девяти уложенных друг на друга широкой стороной проводников. Лобовые части обмотки *3* якоря крепят с помощью пластмассовых обмоткодержателей с запрессованными в них шпильками.

Фазные выводы представляют собой гибкие шины, набранные из тонкой медной ленты и припаянные к жестким луженым нако-

нечникам. Обмотка статора имеет шесть выводов (по три от каждой «звезды») и два вывода нулевых точек.

Корпус ротора *6* сварной, подобен корпусу якоря генератора ГП-311Б. На корпус с натягом напрессован пакет цельноштампованных листов электротехнической стали, в котором выштампованы двенадцать пазов формы «ласточкин хвост». В пазах клиньями крепят полюсы *10* моноблочной конструкции. Сердечники полюсов ротора набраны из листов стали толщиной 1,4 мм, спрессованных и стянутых четырьмя стальными заклепками. Катушки полюсов выполнены из медной ленты, намотанной на ребро, между витками проложена изоляция.

Катушка в сборе с сердечником пропитана эпоксидным компаундом и имеет изоляцию типа «Монолит» класса F. Чередование полярности полюсов достигается поочередной установкой катушек с различными направлениями намотки витков. Катушки соединены последовательно, а выводы подсоединены к стальным контактным кольцам *14*. Кольца от корпуса изолированы пластмассой (класс В).

С противоположной контактным кольцам стороны ротор имеет фланец, соединенный эластичной пластинчатой муфтой с коленчатым валом дизеля.

Подшипниковый щит *1* — сварной конструкции, крепится болтами к корпусу статора. В щите имеется съемная ступица (капсула), обеспечивающая замену подшипника без снятия генератора с тепловоза. Подшипник ротора — самоустанавливающийся, двухрядный, со сферическими роликами.

Щетки марки ЭГ-4, помещенные в латунные щеткодержатели, подводят ток к обмотке возбуждения. Щеткодержатели укреплены на двух подвесках (на каждой подвеске по три щеткодержателя).

Воздух для охлаждения подается в генератор через сборный стальной патрубок со стороны, противоположной контактным кольцам (со стороны дизеля). В нижней части подшипникового щита под контактными кольцами укреплен стальной патрубок, через который выбрасывается нагретый воздух. Охлаждающий воздух забирается снаружи через фильтры, установленные с боков кузова.

Синхронный генератор **ГСТ 2800-1000** (рис. 3.36) предназначен для эксплуатации на тепловозах с электрической передачей переменно-постоянного и переменно-переменного тока мощностью до 3000 кВт и служит для преобразования механической энергии в электрическую.

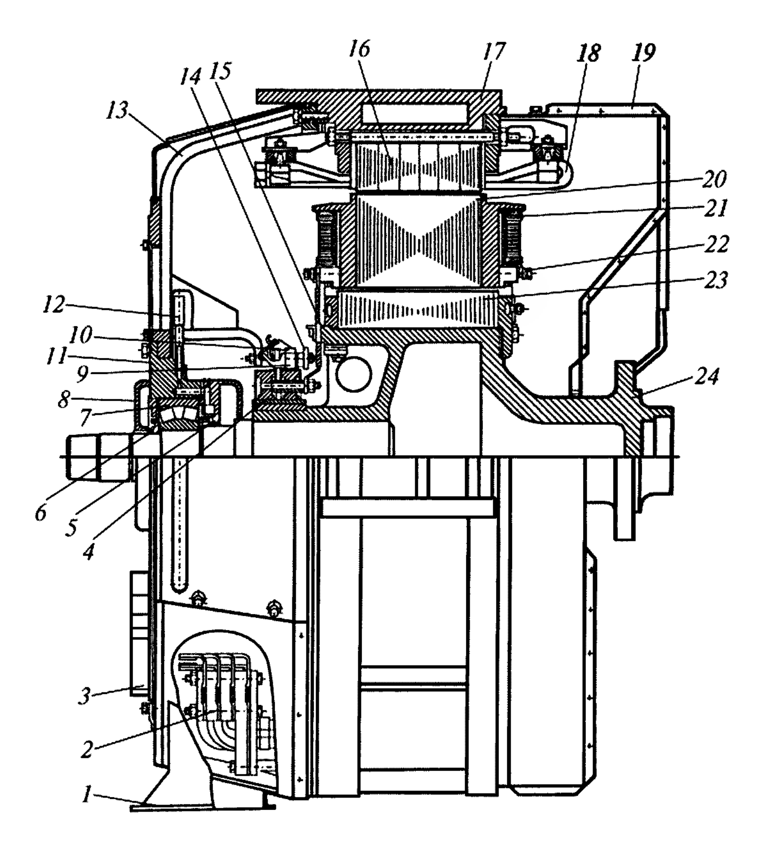


Рис. 3.36. Продольный разрез синхронного тягового генератора ГСТ 2800-1000: *1* — выходной патрубок; *2* — выводы обмоток статора; *3* — клицы; *4* — контактные кольца; *5*, *8* — задняя и передняя крышки подшипника; *6* — уплотнительное кольцо; *7* — роликовый подшипник; *9* — щеткодержатель; *10* — щетка; *11* — ступица; *12* — смазочная трубка с масленкой; *13* — подшипниковый щит; *14* — траверса; *15* — соединительная шина; *16*, *18* — сердечник и обмотка статора; *17* — корпус; *19* — кожух; *20*, *21* — сердечник и катушка полюса; *22* — межполюсная шина; *23* — магнитопровод; *24* — корпус ротора

Тяговый генератор вырабатывает трехфазный ток частотой до 100 Гц, который подается в выпрямительную установку для питания тяговых электродвигателей постоянного тока. Если тяговые электродвигатели тепловоза не постоянного, а переменного тока, то ток от генератора к тяговым электродвигателям подается через выпрямительную установку и инверторный преобразователь.

Генератор представляет собой синхронную машину защищенного исполнения с принудительной вентиляцией, с явно выраженными 12 полюсами на роторе, с независимым возбуждением. Для охлаждения генератора охлаждающий воздух подается осевым вентилятором через сборный стальной патрубок со стороны, противоположной контактным кольцам (со стороны дизеля). Для выброса нагретого воздуха из генератора в нижней части подшипникового щита под контактными кольцами укреплен стальной патрубок *1*. Также воздух может частично выбрасываться в кузов тепловоза. Для очистки охлаждающего воздуха от пыли, снега, масла и капель воды, забираемого снаружи, имеются воздушные фильтры.

Основные технические характеристики генератора приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Основные параметры тягового генератора ГСТ 2800-1000

Параметр	Исполнение тяговых генераторов	
	ГСТ 2800-1000У2	ГСТ 2800-1000Т2
Мощность активная, кВт	2800	1850
Напряжение линейное, пониженное/повышенное, В	580/360	535/345
Действующее значение линейного тока при напряжении пониженном/повышенном, А	2×1500/2×2400	2×1100/2×1700
Максимальное значение действующего линейного тока, А	2×3700	2×2700
Номинальная частота вращения ротора, $с^{-1}$ (об/мин)	16,67(1000)	
Номинальная частота электрического тока, Гц	100	
Коэффициент полезного действия, %	95,9/95	95
Значение выпрямленного напряжения, В	750/475	700/425
Значение выпрямленного тока, А	3660/5900	2360/3900
Значение выпрямленного максимального тока (в течение 2 мин), А	8700	6600
Максимальный ток возбуждения, соответствующий точке продолжительного режима при высшем напряжении 580±29 В, А	185	—
Номинальный расход охлаждающего воздуха, $м^3/с$	4,45	4,0
Номинальное статическое давление, Па	1372	500

Корпус *17* статора генератора изготовлен из толстолистовой стали. В корпус запрессован сердечник *16*, изготовленный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, покрытых электроизоляционным лаком. Сердечник разбит на пакеты, содержащие шесть слоев сегментов, каждый из которых набран на 24 шпильках со скользящей посадкой в корпусе статора. Через определенное число листов статора в пакете проложены изолирующие листы из стеклотекстолита.

В сердечнике прорезаны пазы, куда уложены две двухслойные трехфазные обмотки статора. Секции обмотки имеют прямоугольную форму и крепятся в пазу клиньями из стеклотекстолита. Лобовые части от радиального и тангенциального перемещения фиксируются обмоткодержателями, изоляция которых изготовлена из миканита.

Изоляция катушек обмотки статора — класса F, термореактивная «Монолит-2». Обмотка статора выполнена по схеме двух независимых «звезд», сдвинутых одна по отношению к другой на 30°.

Для установки генератора на поддизельную раму к корпусу статора параллельно его оси приварены опорные лапы. Для повышения жесткости лап перпендикулярно им приварены стальные ребра с проушинами, предназначенные для подъема и транспортировки генератора. В верхней части корпуса приварены кронштейны, являющиеся опорами для установки на генераторе синхронного возбудителя и стартер-генератора. Торец сердечника статора со стороны подшипникового щита опирается на вертикальную стенку корпуса статора, а с противоположной стороны — на нажимную шайбу статора, вместе с которой сердечник запрессован и зафиксирован болтами под прессом.

Корпус *24* ротора генератора — сварной, подобен корпусу якоря генератора ГП-311Б. На корпус с натягом напрессован пакет цельноштампованных листов электротехнической стали. В пакете выштампованы двенадцать пазов формы «ласточкин хвост». В пазах клиньями крепят сердечники полюсов *20* моноблочной конструкции, набранные из листов конструкционной стали толщиной 1,4 мм, спрессованные и стянутые четырьмя стальными заклепками или шпильками.

Благодаря контактным кольцам и щеткам обеспечивается питание обмотки возбуждения полюсов ротора постоянным током. Кон-

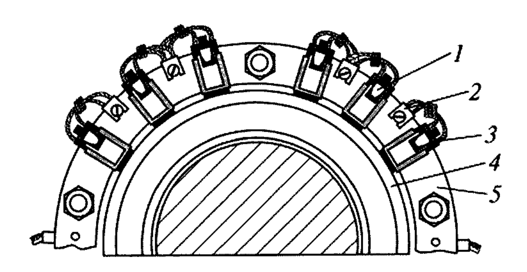


Рис. 3.37. Контактная система тягового генератора ГСТ:
1 — щеткодержатель; *2* — шунт; *3* — щетка; *4* — контактное кольцо; *5* — траверса

тактные кольца *4* (рис. 3.37) изготовлены из стали и насажены на изоляционный цилиндр, напрессованный на корпус ротора. К каждому контактному кольцу прикреплена токоотводящая шпилька. К траверсе *5* прикреплены щеткодержатели *1* со щетками *3*. Необходимое нажатие на щетку обеспечивается спиральными пружинами. Траверса посредством четырех изоляторов и болтов прикреплена к изогнутым ребрам, находящимся на внутренней полости тягового генератора. Для обеспечения нормального контакта поверхности щеток шлифуют и при сборке притирают к рабочим поверхностям контактных колец.

Ток к щеткам подводится по медным шунтам *2*, соединенным с токосборными шинами, к которым подводится питание от источника постоянного тока. Камера контактных колец закрыта крышками, установленными по периметру конусной части подшипникового щита.

Тяговые агрегаты (рис. 3.38) включают в себя тяговые синхронные генераторы и синхронные генераторы собственных нужд. Их применяют на тепловозах мощностью от 2800 и 7500 кВт для снижения массы, уменьшения габаритных размеров, числа машин и облегчения компоновки оборудования. На тепловозах 2ТЭ121, ТЭП80, 2ТЭ25А «Витязь» применены тяговые агрегаты, которые включают в себя тяговые синхронные генераторы и синхронные генераторы собственных нужд, который на тепловозе ТЭП75 именуется генератором энергоснабжения.

Исполнение тягового агрегата — защищенное, с независимой нагнетательной системой вентиляции. Статор тягового синхронного генератора является основным несущим узлом тягового агрегата. Для размещения синхронного генератора собственных нужд агрегат имеет промежуточный щит и удлиненную станину. На станине агрегата имеются опорные лапы для крепления на поддизельной раме и ребра жесткости, в которых расположены отверстия,

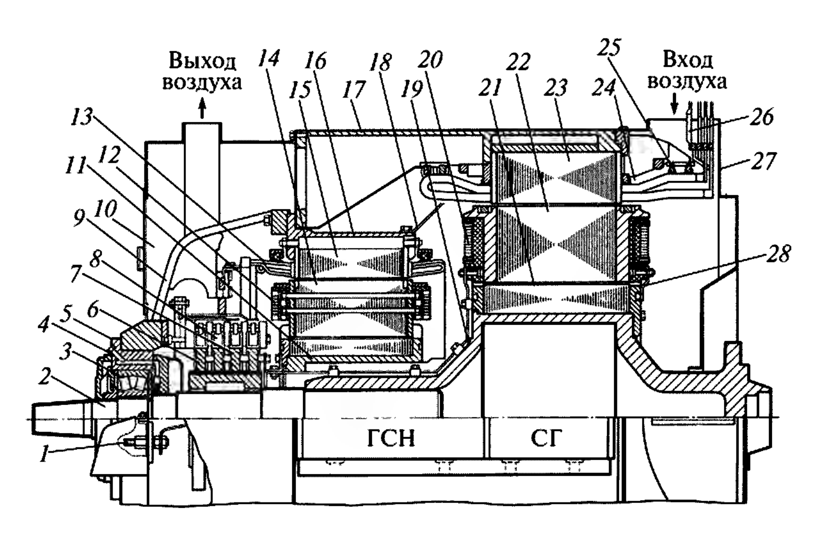


Рис. 3.38. Тяговый агрегат:

1 — выводы обмотки ротора; *2* — вал; *3* — подшипник; *4* — масленка; *5* — съемная ступица; *6*, *7* — контактные кольца; *8* — щеткодержатели; *9* — подшипниковый щит; *10* — патрубок для выхода охлаждающего воздуха; *11*, *21* — остовы ротора вспомогательного и тягового генераторов; *12* и *14*, *20* и *22* — катушки и сердечники полюсов ротора; *13*, *24* и *15*, *23* — обмотки и сердечники статоров; *16*, *17* — корпуса статоров генераторов; *18* — направляющий щиток; *19* — соединение обмоток ротора с контактными кольцами; *25* — крепление лобовых частей обмотки; *26* — выводы фаз и нулевых точек обмотки статора; *27* — патрубок для входа воздуха; *28* — соединение катушек полюсов ротора

используемые при транспортировке, а также подставки для монтажа блоков выпрямительной установки.

Для обеспечения жесткости конструкции станина генератора собственных нужд упирается в торец промежуточного щита и то же время является передней нажимной шайбой для тягового генератора. Торцевой подшипниковый щит агрегата по конструкции подобен щиту синхронного тягового генератора типа ГС-501. Роторы агрегата имеют общий сварно-литой корпус, на котором расположены две самостоятельные системы полюсов — тягового генератора и генератора собственных нужд. За генератором собственных нужд расположены контактные кольца обеих машин.

Генератор собственных нужд предназначен для питания устройств автоматики, независимой обмотки возбуждения тягового

генератора, электрических машин привода вспомогательного оборудования и др. По конструкции генератор собственных нужд — явнополюсная машина, имеющая 12 полюсов, расположенных на роторе. Обмотки возбуждения полюсов ротора получают питание от собственной статорной обмотки. В пазах статора располагаются две трехфазные обмотки, сдвинутые на угол 30°.

Сердечник статора выполнен из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, в которых сделаны пазы и 40 вентиляционных каналов. В пазы статора уложена волновая обмотка, имеющая изоляцию класса H. Лобовые части обмотки статора крепятся к корпусу статора специальными обмоткодержателями. Сердечники полюсов ротора набраны из листов стали толщиной 1,4 мм, спрессованы и стянуты шпильками.

Обмотки полюсов ротора выполнены из медной ленты ЛММ 1,08×22 мм, намотанной на ребро, и имеют изоляцию класса F типа «Монолит-2».

Агрегат имеет 20 выводов, из которых восемь выводов от обмотки статора тягового генератора расположены со стороны дизеля, в том числе шесть — от двух «звезд» и два — от нулевых точек. Двенадцать выводов расположены со стороны контактных колец: шесть — от двух «звезд» обмотки статора генератора собственных нужд, два — от нулевых точек и четыре — от обмоток возбуждения тягового синхронного генератора и синхронного генератора собственных нужд.

3.6. Тяговые электродвигатели переменного тока

Коллекторные тяговые электродвигатели, имея высокие технико-экономические показатели, обладают существенными недостатками. Это, в первую очередь, относится к коллекторно-щеточному узлу, на обслуживание которого затрачиваются значительные средства. Кроме того, мощность свыше 1200 кВт на одну ось с помощью коллекторных тяговых электродвигателей реализовать невозможно.

Из бесколлекторных тяговых электродвигателей на ТПС применяют асинхронные и вентильные. Вентильные тяговые электродвигатели занимают промежуточное положение между двигателями постоянного тока и синхронными двигателями.

С появлением и внедрением полупроводниковой техники появилась возможность заменить коллекторно-щеточный узел полупроводниковым коммутатором.

В этом двигателе главные полюсы с обмотками возбуждения расположены на роторе, а обмотка якоря — на статоре, т.е. двигатель выполнен *обращенной конструкции.*

В двигателе постоянного тока секции присоединяют к «петушкам» коллекторных пластин, а в вентильном двигателе — через сдвоенный управляемый тиристорный ключ непосредственно к сети постоянного тока.

На рис. 3.39 показана схема обращенной конструкции двигателя постоянного тока: коллектор этого двигателя неподвижен, а щетки механически соединены с валом машины и вращаются вместе с ротором. Здесь же показано направление токов в секциях якоря. При повороте полюсов со щетками секции поочередно проходят в зону действия полюса другой полярности, т.е. в другую параллельную ветвь. В коммутируемых секциях соответственно изменяется направление тока. А в вентильном двигателе (см. рис. 3.40) — необходимо открывать тиристоры, имеющие то же положение, что и щетки. Для момента времени t_1 ток в обмотку статора поступает через тиристоры *1* и *n*. Остальные вентили закрыты. Если поворачивать ротор с полюсами, секция *1* перейдет в зону действия другого полюса, а тиристоры *1* и *n* закрываются. Открываются тиристоры *2* и *n* + 1 и т.д. В итоге получаем такое же распределение токов в обмотке якоря, как и у коллекторного двигателя.

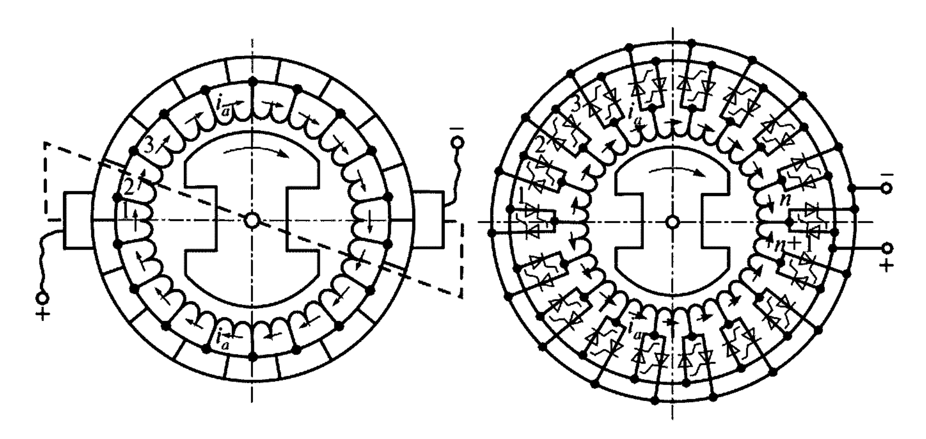


Рис. 3.39. Схема обращенного двигателя постоянного тока

Рис. 3.40. Схема вентильного двигателя с замкнутой обмоткой якоря

Для того чтобы поочередно открывать тиристоры, в зависимости от положения главных полюсов ротора, предусмотрено специальное устройство — датчик положения. В общем случае датчик положения состоит из возбудителя, соединенного непосредственно с валом двигателя, и чувствительных элементов, создающих сигнал при определенных положениях возбудителя. Сигнал подает команду на переключение тиристоров. Датчики положения ротора могут быть электронными, лучевыми, магнитными и др.

Вентильные тяговые электродвигатели. В вентильных тяговых электродвигателях уменьшают количество секций и применяют разомкнутую обмотку якоря — многофазную. Наиболее часто применяют трехфазную (рис. 3.41, *а*). На роторе располагается обмотка возбуждения, которая получает питание от источника постоянного тока. Обмотка якоря, выводы которой *А*, *В*, *С* подключены к трехфазному тиристорному мосту с тиристорами Т1—Т6. Тиристорный мост подключен к источнику постоянного тока. Для снижения пульсаций потребляемого тока в эту же цепь включен сглаживающий реактор $L_{ср}$.

Поочередное открытие тиристоров в соответствии с диаграммой (рис. 3.41, *б*) создает вращающееся магнитное поле статора (якоря).

Основным недостатком вентильных тяговых электродвигателей является наличие скользящего контакта на роторе, предназначенного для питания обмоток возбуждения полюсов. Поэтому в современных тепловозах вентильные тяговые электродвигатели, как правило, в настоящее время не используют, а применяют асинхронные тяговые электродвигатели.

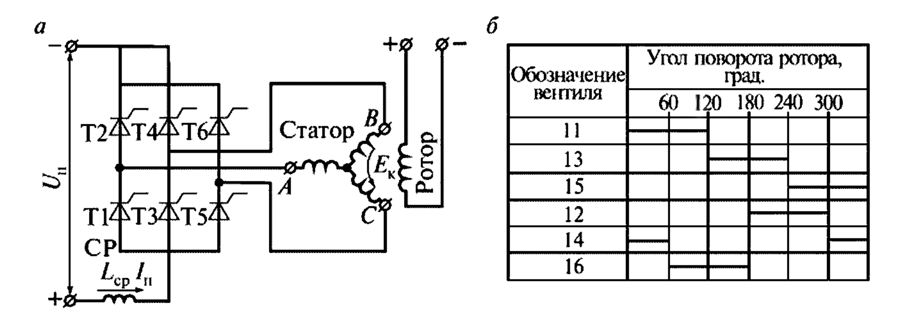


Рис. 3.41. Схема включения тиристорного моста в цепь вентильного двигателя со звеном постоянного тока (*а*) и диаграмма открытия тиристоров (*б*)

В асинхронных тяговых электродвигателях с короткозамкнутым ротором отсутствует контакт. Однако асинхронным двигателям присущ ряд недостатков, о которых указывалось выше.

Асинхронные тяговые электродвигатели, как и коллекторные, по конструкции могут быть корпусными и бескорпусными.

Рассмотрим вначале корпусную конструкцию. Корпус выполняют из цельной стальной отливки или сварным. Он имеет две цилиндрические посадочные поверхности: под посадку подшипниковых щитов и внутреннюю цилиндрическую поверхность для посадки сердечника статора. Кроме того, на корпусе располагают площадки для установки коробки выводов, приливы для крепления корпусов зубчатой передачи.

Сердечник *1* статора (рис. 3.42) выполняют из тонколистовой электротехнической стали марки 2212, толщиной 0,5 мм. По торцам сердечника размещены листы *2*, выполненные из конструкционной стали толщиной 1 мм, соединенные между собой точечной электросваркой. Весь пакет с обоих торцов зажат жесткими боковинами *3* в виде колец, выполненных из толстолистовой стали толщиной 20—25 мм. Сквозь сердечник и боковины выштампованы аксиальные вентиляционные каналы. По наружной поверхности сердечника расположены шесть накладных пластин-стяжек *4* с выступами, которые укладывают в специальные аксиальные па-

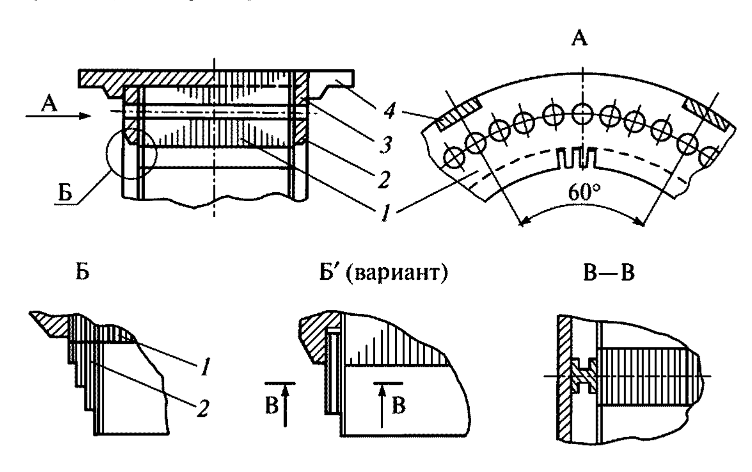


Рис. 3.42. Статор корпусного исполнения:
1 — листы статора; *2* — крайние листы; *3* — боковины; *4* — стержни-стяжки

зы и сваривают в монолитную конструкцию. Для предотвращения «распушения» листов сердечника статора крайние листы *2* делают ступенчатыми (вид Б на рис 3.42). Иногда применяют установку пальцев (вид Б′), выполненных из прямоугольного или из ступенчатого двутаврового сечения (разрез В—В).

В последнее время появилась тенденция выполнения бескорпусных статоров, которое применяют при опорно-рамном подвешивании асинхронного тягового электродвигателя. В этом случае статор нагружен усилиями силовой передачи.

При бескорпусном статоре (рис. 3.43) шихтованный сердечник *2* размещают между двумя полукорпусами *1* и *4*. Снаружи сердечника расположены стержни продольной жесткости *3*, изготовленные из толстолистового проката или кованой заготовки. Стержни могут быть прямоугольной или трапецеидальной формы типа «ласточкин хвост».

Полукорпусы и сердечник сжимаются определенным усилием, поэтому стержни *3* приваривают к полукорпусам и к сердечнику без снятия сжимающих усилий. Образуется цельная конструкция. Волновые обмотки используют реже из-за большого количества паяных соединений, которые приходится изолировать вручную. Изоляция класса H и F.

В асинхронном тяговом электродвигателе применяют роторы с короткозамкнутой обмоткой. Сердечник выполняют из отдельных листов электротехнической стали марки 2212 толщи-

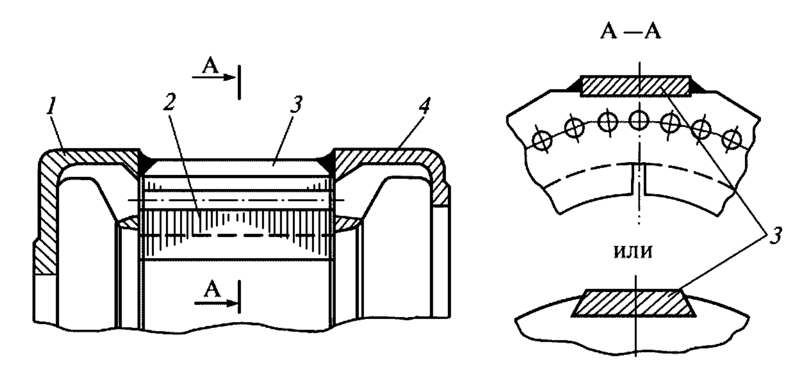


Рис. 3.43. Статор бескорпусного исполнения:
1, *4* — полукорпусы; *2* — листы статора; *3* — стержни продольной жесткости

ной 0,5 мм. В сердечнике выполнены пазы, формы которых показаны на рис. 3.44. В пазы ротора заливают расплавленный алюминий или его сплавы. Также могут укладывать неизолированные медные стержни *6* (рис. 3.45). На выступающие концы стержней приваривают или припаивают короткозамкнутые кольца. На кольца с определенным натягом насаживают бандажные кольца *8*, выполненные из высокопрочной немагнитной стали или из бериллиевой бронзы.

Сердечник *7* собирают на втулке *12*, которую напрессовывают на вал *1*. С торцов сердечник зажат нажимными шайбами *4* и *9*.

Для динамической балансировки ротора предусмотрены специальные диски, на которых закреплены дополнительные грузы *11*.

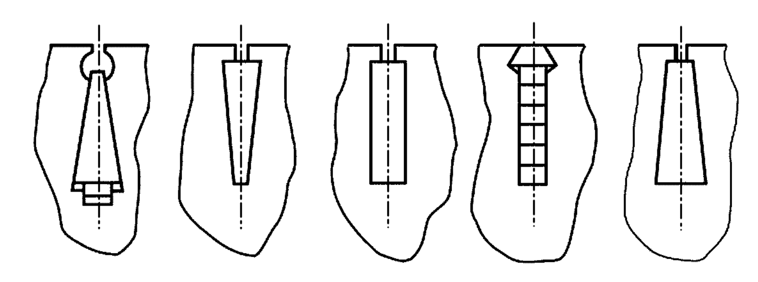


Рис. 3.44. Конструкция пазов ротора асинхронного тягового электродвигателя

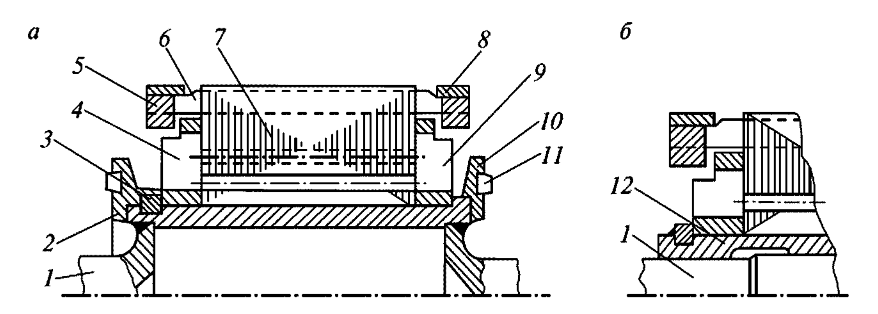


Рис. 3.45. Конструкция ротора асинхронного тягового электродвигателя:
1 — вал; 3 — шпонка; *4*, *9* — нажимные шайбы; *5* — короткозамкнутые кольца обмотки ротора; *6* — стержни обмотки; *7* — сердечник; *8* — бандажные кольца; *10*, *2* — специальные диски; *11* — дополнительные грузы для динамической балансировки; *12* — втулка

Окончательно собранный ротор пропитывают жаростойким кремнийорганическим лаком.

Асинхронные тяговые электродвигатели **ДАТ-305, ДАТ-470, ДАТ-510** предназначены для привода колесных пар грузовых, пассажирских и маневровых тепловозов с электрической передачей переменно-переменного тока. Применяются на тепловозах 2ТЭ35А, 2ТЭ25А, ТЭМ21, ТЭМ10А.

Конструктивно асинхронные тяговые электродвигатели отличаются мощностью, а следовательно, размерами. В качестве примера рассмотрим конструкцию асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-510 (рис. 3.46).

Двигатель выполнен корпусным. Корпус *13* выполнен цилиндрическим и изготовлен из углеродистой стали марки Ст3кп2. С торцов корпус закрыт большим *9* и малым *18* подшипниковыми щитами.

Сердечник статора 14 помещен в оправку *15*, оправка с сердечником и обмотками запрессована в корпус *13*. Толщина стенок корпуса рассчитана, исходя из условий прочности. Пакет статора набран из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм и закреплен нажимными шайбами *12* и *16*. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена двухслойная петлевая обмотка *11*. Активные стороны обмотки закреплены в пазах изоляционными клиньями, а затем пропитаны в изоляционном лаке и подвергнуты сушке. Лобовые части обмотки статора закреплены конусными кольцами.

Обмотка статора изолирована от корпуса полиамидной пленкой и стеклолентой, пропитанной электроизоляционным лаком КО-916К.

Обмотка статора соединена «звездой» и концы обмотки выведены в коробку выводов. На выводы обмотки нанесена маркировка: U — начало первой фазы, V — начало второй фазы, W — начало третьей фазы.

Ротор состоит из вала, сердечника и короткозамкнутой обмотки. На вал *22* ротора напрессована втулка *24* в виде трубы с расположенными на нем лабиринтными кольцами *6* и *23*. На втулку напрессован сердечник, набранный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В сердечнике сделаны пазы, в которые заливается алюминиевый сплав; при отвердевании сплава образуются стержни, к концам которых приваривают кольца из этого же материала, в результате образуется короткозамкнутая обмотка типа «беличье колесо». Пазы ротора имеют полуовальную полузакрытую форму.

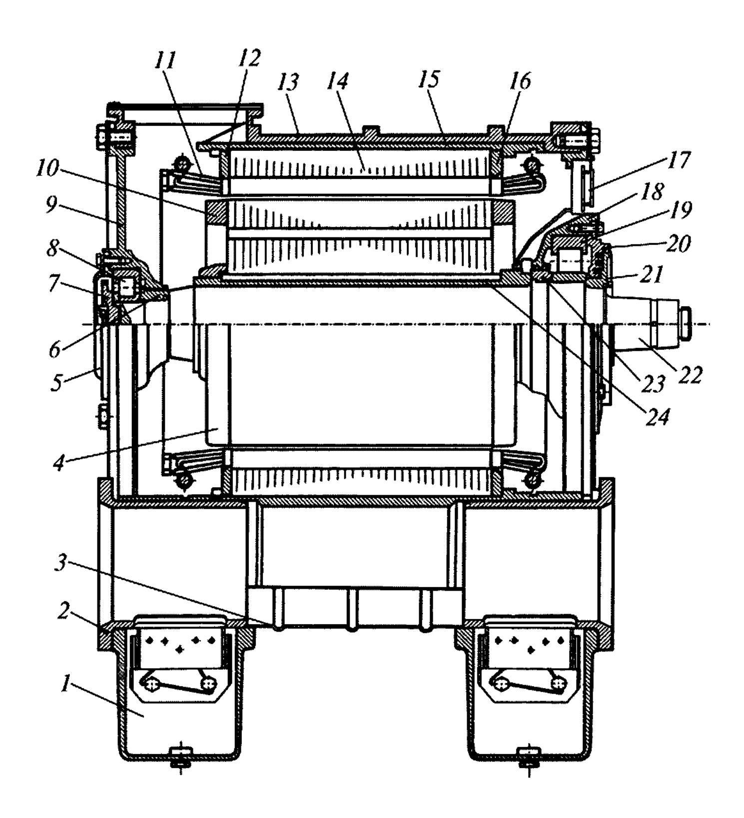


Рис. 3.46. Разрез асинхронного тягового электродвигателя ДАТ-510:
1 — «шапка» моторно-осевого подшипника; *2* — вкладыш моторно-осевого подшипника; *3* — кожух; *4* — ротор; *5, 20* — крышка подшипника; *6, 23* — лабиринтное уплотнение; *7* — упорная шайба; *8, 19* — подшипник; *9, 18* — большой и малый подшипниковые щиты; *10, 11* — обмотки ротора и статора; *12, 16* — нажимные шайбы; *13* — корпус; *14* — сердечник статора; *15* — оправка; *17* — вентиляционный люк; *21* — лабиринтное кольцо; *22* — вал; *24* — втулка ротора

Вал ротора изготовлен из легированной стали марки 30ХМА с термообработкой. Свободный конец вала для посадки шестерни имеет конусность 1:10 и отверстия для маслосъёма. В сердечнике ротора выполнены два ряда аксиальных каналов для вентиляции.

Подшипниковые щиты 9 и *18* выполнены сварными и оборудованы камерами, которые закрыты крышками *5* и *20.* Камеры предназначены для сброса отработанной смазки.

В подшипниковом щите со стороны, противоположной выступающему концу вала, устанавливается датчик частоты вращения ротора, взаимодействующий с зубчатым венцом упорной шайбы *7* подшипника *8.* На вентиляционном люке *17* предусмотрено установочное место для монтажа датчика температуры.

Асинхронный тяговый электродвигатель может быть выполнен в двух исполнениях: для опорно-осевого подвешивания в грузовом, вывозном и маневровом движении и для рамного подвешивания — в пассажирском движении.

Для охлаждения двигателя предусмотрена вентиляция. Поток воздуха подается через окно корпуса *13.* В тяговом электродвигателе ДАТ-510 находятся внутренние осевые ребра жесткости, образующие каналы для прохода воздуха, охлаждающего лобовые части обмотки *11* статора со стороны соединений. Воздух проходит через аксиальные каналы шихтованного сердечника ротора *4,* охлаждает лобовые части обмотки статора со стороны привода и, нагреваясь, выбрасывается наружу через жалюзи на вентиляционных люках *17* подшипникового щита *18* со стороны привода.

3.7. Вспомогательные машины переменного тока

***Возбудитель* ВС-650** предназначен для питания переменным током (через выпрямитель) обмотки возбуждения тягового генератора. Он представляет собой (рис. 3.47) однофазный синхронный генератор защищенного исполнения.

Технические характеристики возбудителя

Род тока	Переменный
Мощность, кВт	25
Напряжение, В	287
Ток, А	145
Частота вращения, об/мин	3300
Класс изоляции	В

Статор состоит из станины *8,* изготовленной из толстолистовой стали, полюсов *14* с обмотками возбуждения *15,* подшипниковых щитов *6* и *17,* щеткодержателей со щетками.

Сердечники полюсов собирают из листовой стали, спрессовывают и стягивают заклепками. В полюсные наконечники встроена демпферная обмотка в виде медных стержней круглого и прямоугольного сечений. Катушки возбуждения соединены последовательно.

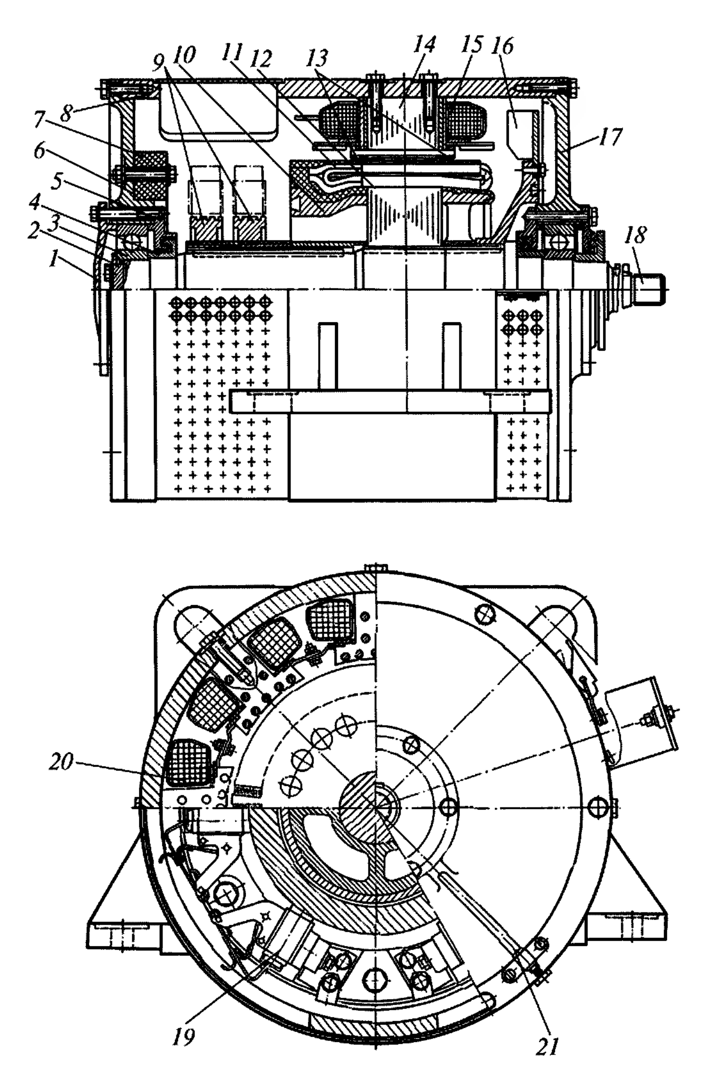


Рис. 3.47. Продольный и поперечный разрезы возбудителя ВС-650В:
1, *5* — наружная и внутренняя крышки подшипника; *2* — упорное кольцо; *3* — шарикоподшипник; *4* — уплотнительное кольцо; *6*, *17* — подшипниковые щиты; *7* — траверса; *8* — станина; *9* — контактные кольца; *10* — якорь; *11*, *12* — обмотка и сердечник якоря; *13* — стеклобандаж; *14*, *15* — сердечник и катушка полюса; *16* — вентилятор; *18* — вал; *19* — щеткодержатель; *20* — пазы якоря; *21* — маслопроводные трубки

Концы обмоток U_1 и U_2 выведены в коробку выводов. Изоляция обмотки возбуждения — класса F. В собранном виде сердечник полюса с катушкой возбуждения пропитывают в эпоксидном компаунде.

Якорь 10 возбудителя приводится во вращение через распределительный редуктор дизеля. Сердечник якоря собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм и напрессовывают на вал. В осевом направлении сердечник удерживается с одной стороны обмоткодержателем (со стороны свободного конца вала) и латунной втулкой — с другой. В сердечнике выполнены пазы, куда укладывают волновую обмотку *11*. Обмотка укреплена на сердечнике посредством бандажей *13*. Выводы обмотки с помощью двух контактных шпилек соединены с контактными кольцами *9*, которые напрессовывают на вал через изоляционный слой и латунную втулку. Контактные кольца изготовляют из антикоррозионной стали.

Вал якоря опирается на подшипники *3*, установленные в подшипниковых щитах *6* и *17*. Подшипники закрыты с обеих сторон крышками *1* и *5* с лабиринтными уплотнениями. Подшипниковые щиты центрируются в станине замками и закреплены на ней болтами. Смазку в подшипники добавляют через маслопроводящие трубки *21*, вваренные в отверстия подшипниковых щитов со стороны привода и контактных колец. При запрессовке смазка, заполняя внутреннюю смазочную полость каждого из подшипниковых узлов, проходит между шариками подшипников, смазывает их и попадает в наружную смазочную полость.

Щеткодержатели 19 крепятся на пластмассовой траверсе 7 и соединены токосборными шинами с отводами, идущими в коробку выводов. Траверса *7* крепится болтами к переднему подшипниковому щиту. Конструкция щеткодержателя предусматривает постоянство усилия нажатия пружины на щетку по мере срабатывания последней. Маркировка выводов С1 и С2.

***Мотор-вентилятор* МВ-11** (рис. 3.48) предназначен для охлаждения холодильной камеры и представляет собой асинхронный двигатель вертикального исполнения с внешним ротором.

Технические данные мотор-вентилятора

Мощность, кВт	24
Напряжение номинальное, В	394
cos φ	0,7

КПД, % 89
Частота вращения ротора, об/мин 1960
Класс изоляции .... Н
Масса, кг 257

Вал ротора *6* установлен внутри втулки *7* на двух шарикоподшипниках. Нижний подшипник удерживается на валу кольцом, верхний — гайкой. Верхний подшипник имеет лабиринтные уплотнения. Сердечник ротора набран из листов электротехнической стали и содержит 56 пазов, расположенных на внутренней поверхности сердечника. В пазы заливается расплавленный алюминиевый сплав АКМ, к получившимся стержням привариваются кольца и образуется короткозамкнутая обмотка типа «беличье колесо». Ротор после запрессовки в корпус вентиляторного колеса фиксируется четырьмя штифтами.

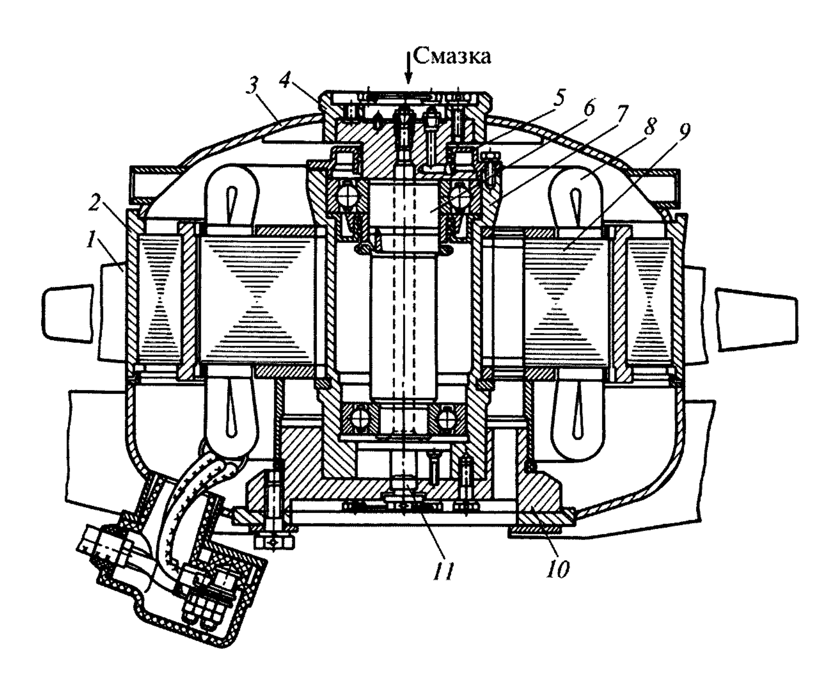


Рис. 3.48. Мотор-вентилятор МВ-11:
1 — вентиляторное колесо; *2* — ротор; *3* — днище; *4*, *7* — втулки; *5* — верхняя крышка; *6* — вал ротора; *8* — обмотка статора; *9* — сердечник; *10* — основание; *11* — пробка

Сердечник *9* статора напрессован на втулку *7*, которая крепится к основанию *10*. От проворота сердечник на втулке удерживается шпонкой, а от смещения вдоль оси — двумя шайбами и полукольцами. Сердечник статора набран из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, листы изолированы друг от друга лаком. Обмотка статора — трехфазная, двухслойная, симметричная, обмотки соединены в «звезду». Катушки обмотки статора имеют по пять витков из провода ПСДК диаметром 1,45 мм.

Колесо вентилятора вместе с ротором подвергают динамической балансировке.

Тахогенератор **ТГС-12** работает в качестве датчика частоты вращения колесных пар тепловоза и представляет собой синхронный генератор с магнитоэлектрическим возбуждением. Он может вращаться в обоих направлениях.

Контрольные вопросы

1. Какова конструкция асинхронного двигателя?
2. Каков принцип действия асинхронного двигателя?
3. Что такое скольжение и как оно определяется?
4. На какие типы подразделяют асинхронные двигатели?
5. Как осуществляют пуск в ход асинхронного двигателя?
6. В каких случаях не применяют специальные пусковые устройства в асинхронных двигателях?
7. Какими способами регулируют частоту вращения ротора асинхронного двигателя?
8. Как реверсируют асинхронный двигатель?
9. В каких случаях асинхронный двигатель подключают к сети «звездой» или «треугольником»?
10. От каких параметров зависит электромагнитный момент асинхронного двигателя?
11. Какова конструкция тягового асинхронного двигателя?
12. Какова конструкция синхронного генератора?
13. Какова конструкция синхронного двигателя?
14. Как осуществляют пуск в ход синхронного двигателя?
15. Почему синхронные машины могут улучшать коэффициент мощности сети?

Глава 4. ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. Принцип действия и классификация трансформаторов

Принцип действия. *Трансформатором* называется электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения. Трансформатором понижают или повышают напряжение, изменяют число фаз и в некоторых случаях могут изменять частоту переменного тока.

Трансформатор, схема которого изображена на рис. 4.1, *а*, состоит из сердечника (магнитопровода), набранного из листов электротехнической стали, и двух или нескольких обмоток, расположенных на нем. Передача энергии из одной обмотки в другую осуществляется путем электромагнитной индукции.

Обмотка, к которой подводится переменный ток, называется первичной. К другой обмотке — вторичной — подключен потребитель $Z_н$. Все величины (ток, напряжение, ЭДС, МДС и др.), относящиеся ко вторичной обмотке, обозначают индексом «2».

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки трансформатора к сети с переменным синусоидальным напряжением U_1 (рис. 4.1, *б*) в обмотке возникает ток I_1, который создает синусоидально изменяющийся магнитный поток Ф, замыкающийся по магнитопроводу и пересекающий витки первичной и вторичной

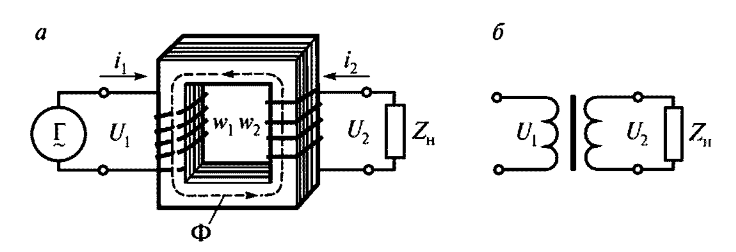


Рис. 4.1. Электромагнитная (*а*) и принципиальная (*б*) схемы трансформатора

обмоток, индуктирует в них ЭДС. В первичной обмотке индуктируется ЭДС e_i самоиндукции

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \qquad (4.1)$$

во вторичной обмотке индуктируется ЭДС взаимоиндукции

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \qquad (4.2)$$

Знак (–) указывает, что ЭДС e_1 и e_2 направлены против причины, их вызвавшей, т.е. против изменения магнитного потока (правило Ленца). Если ко вторичной обмотке подключить нагрузку $Z_н$, то по этой обмотке будет протекать ток I_2 и на ее зажимах появится некоторое напряжение U_2. Результирующий магнитный поток Ф создается токами этих обмоток. Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высокого (высшего) напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, называют *обмоткой низкого (низшего) напряжения* (НН).

При синусоидальном магнитном потоке

$$\Phi = \Phi_{max} \sin \omega t, \qquad (4.3)$$

где Φ_{max} — максимальное значение потока, Вб.

Подставив (4.3) в (4.1), получим

$$e_1 = -w \frac{d\left(\Phi_{max} \sin \omega t\right)}{dt} = -w_1 \Phi_{max} \omega \cos \omega t. \qquad (4.4)$$

Из математики известно, что

$$\cos \omega t = -\sin(\omega t - 90°), \qquad (4.5)$$

поэтому

$$e_1 = w_1 \Phi_{max} \omega \sin(\omega t - 90°). \qquad (4.6)$$

То же с ЭДС e_2:

$$e_2 = w_2 \Phi_{max} \omega \sin(\omega t - 90°). \qquad (4.6,\ a)$$

В формулах (4.6) и (4.6, *а*) максимальные значения ЭДС будут равны

$$E_{1max} = w_1 \Phi_{max} \omega, \qquad (4.7)$$

$$E_{2max} = w_2 \Phi_{max} \omega. \qquad (4.8)$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi f$, определяем действующее значение ЭДС E_1 и E_2

$$E_1 = \frac{w_1 \Phi_{max} 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4{,}44 w_1 \Phi_{max} f, \quad (4.9)$$

$$E_2 = \frac{w_2 \Phi_{max} 2\pi f}{\sqrt{2}} = 4{,}44 w_2 \Phi_{max} f. \quad (4.10)$$

Отношения ЭДС высшего напряжения к ЭДС низшего напряжения называется коэффициентом трансформации k

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44 w_1 \Phi_{max} f}{4{,}44 w_2 \Phi_{max} f} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}. \quad (4.11)$$

Классификация трансформаторов. Трансформаторы классифицируют по следующим признакам:

– по назначению — силовые тяговые, силовые общего и специального назначения, сварочные, импульсные, для преобразования числа фаз и др.;

– по виду охлаждения — с воздушным и масляным охлаждением;

– по числу трансформируемых фаз — однофазные и трехфазные;

– по форме магнитопровода — стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;

– по числу обмоток на фазу — однообмоточные, двухобмоточные и многообмоточные.

В энергетике трансформаторы используют:

– для передачи и распределения электроэнергии. Как правило, на крупных и средних электростанциях электроэнергию вырабатывают синхронные генераторы напряжением 6—24 кВ. При таком напряжении при передаче электроэнергии потребителям по линиям электропередачи (ЛЭП) будут протекать большие токи. Из электротехники известно, что мощность $P = UI\cos\varphi$, по этой причине при увеличении тока требуется соответственно увеличивать сечение проводов ЛЭП. Поэтому для уменьшения сечения проводов уменьшают величину тока, а напряжение с помощью трансформаторов увеличивают до 110, 220, 330, 400, 500, 750 и 1000 кВ. На другом конце ЛЭП, подводящей электроэнергию к потребителям, необходимо уменьшать напряжение. Эту функцию также выпол-

няют трансформаторы. Таким образом, электрическая энергия при передаче от электрической станции к потребителям многократно подвергается преобразованию трансформаторами;

– различных технологических целей: сварки (сварочные трансформаторы), питания гальванических устройств и т.д.;

– обеспечения нужной схемы включения вентилей в преобразовательных устройствах и согласования напряжений на выходе и входе преобразователей.

4.2. Конструкция трансформатора

Части трансформатора, предназначенные для преобразования напряжения (магнитопровод и обмотки) называются *активными частями трансформатора.*

При работе трансформатора выделяется теплота. Для охлаждения активной части применяют воздух или трансформаторное масло. В первом случае трансформатор называется «сухим», а во втором случае «масляным». В последнем случае активную часть помещают в бак с трансформаторным маслом, которое одновременно является изоляцией.

Магнитопровод трансформатора должен обладать небольшим магнитным сопротивлением, высокой механической прочностью и иметь минимальные магнитные потери.

Части магнитопровода, на которых расположены обмотки, называются *стержнями.* Для соединения стержней в замкнутую магнитную цепь предназначено *ярмо.*

Магнитопровод трансформатора изготовляют из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм (при частоте 50 Гц) и толщиной от 0,08 до 0,2 мм (при частоте 400 Гц). Листы изолируют друг от друга лаком или жаростойким покрытием в виде керамических или оксидных пленок, которые не повреждаются при заготовке пластин и их отжиге.

Однофазный стержневой трансформатор (рис. 4.2, *а*) имеет два стержня *1*, на которых расположены обмотки *3* и два ярма *2.* Однофазные стержневые трансформаторы применяют в качестве тяговых на электроподвижном составе. Однофазный броневой трансформатор (рис. 4.2, *б*) имеет один стержень *1*, на котором расположены обмотки *3* и ярмо *2*, которое частично охватывает обмотки подобно «броне».

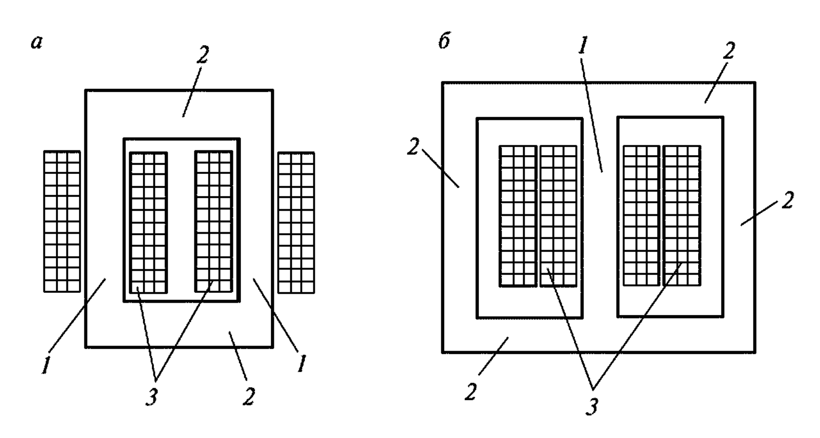


Рис. 4.2. Магнитопроводы однофазных стержневых (*а*) и броневых (*б*) трансформаторов:
1 — стержни; *2* — ярмо; *3* — обмотки

Трехфазные трансформаторы (рис. 4.3, *а*, *б*) имеют три одинаковых стержня *1*, соединенные в замкнутую магнитную цепь ярмами *3*. Как стержни, так и ярма изготавливают из отдельных пластин электротехнической стали. На стержни надеты катушки *2*.

По конструкции сочленения стержней с ярмами трансформаторы подразделяются на стыковые (рис. 4.4, *а*) и шихтованные (рис. 4.4, *б*) магнитопроводы. В первом случае стержни и ярмо собираются отдельно и соединяются друг с другом с помощью стяжных шпилек, а в местах стыков во избежание замыкания листов и возникновения вихревых токов ставятся изоляционные прокладки. Во втором случае стержни и ярма собираются вместе «в переплет» как цельная конструкция.

В настоящее время магнитопроводы трансформаторов выполняются из холоднокатаной электротехнической стали, которая обладает более высокими магнитными свойствами, чем горячекатаная. Однако в этой стали направление проката и направление силовых линий магнитной индукции должны совпадать. При их несовпадении происходит резкое ухудшение характеристик. Если листы имеют прямоугольную форму (рис. 4.5, *а*), то в местах, где линии магнитной индукции поворачиваются на угол 90° (заштрихованный участок), наблюдается увеличение магнитных потерь и падение магнитного напряжения, что приводит в конечном итоге к ухудшению

Рис. 4.3. Магнитопроводы стержневых и бронестержневых трансформаторов: *а*, *б* — схема и внешний вид магнитопровода трехфазного трансформатора; *в*, *г* — схемы магнитопроводов бронестержневых однофазного и трехфазного трансформаторов; *1* — стержни; *2* — обмотки; *3* — ярмо

магнитных характеристик трансформатора. Эти участки называют «зонами несовпадения». Для уменьшения площади «зон несовпадения» на магнитопроводах применяют косые стыки, как показано на рис. 4.5, *б*, или используют ленточные разрезные магнитопроводы (в трансформаторах малой мощности).

Стержни магнитопроводов трансформаторов средней и большой мощности в поперечном сечении имеют форму ступенчатой фигуры, а в трансформаторах малой мощности — форму прямоугольника. Число ступеней фигу-

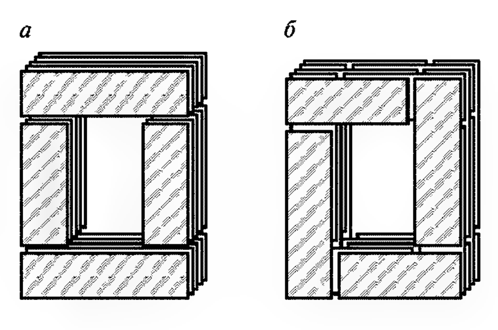


Рис. 4.4. Стыковая (*а*) и шихтованная (*б*) конструкции магнитопроводов

ры увеличивается с возрастанием мощности трансформатора. Увеличение числа ступеней приводит к более полному заполнению площади круга площадью ступенчатой фигуры (рис. 4.5, *в* и *г*). Такая конструкция с точки зрения расхода материалов, уменьшения габаритов и стоимости изготовления трансформатора, а также механической прочности обмоток является наиболее рациональной. В мощных трансформаторах в сечении магнитопровода предусматривают каналы для его охлаждения.

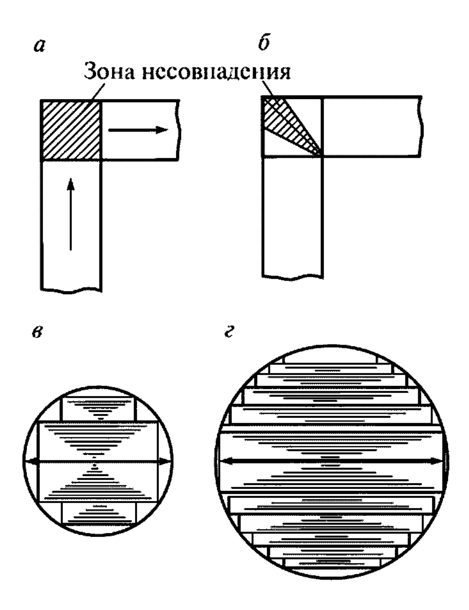


Рис. 4.5. «Зоны несовпадения» при прямом (*а*) и косом (*б*) стыках; форма сечения стержней малой (*в*) и средней и большой (*г*) мощности

Сечение ярма берется с небольшим числом ступеней или даже прямоугольным. Это упрощает технологию их изготовления. Площади сечения ярем выбирают так, чтобы в них она была на 10—15 % меньше, чем в стержнях. Ярма мощных трансформаторов стягивают стальными балками, в маломощных трансформаторах — деревянными.

Провода обмоток трансформатора имеют круглое или прямоугольное сечение и изготавливаются, как правило, из меди, иногда — из алюминия. Для их изоляции используется эмаль, кабельная бумага и хлопчатобумажная пряжа, а в мощных трансформаторах — нагревостойкая изоляция из стекловолокна. Основой обмотки, как правило, является бакелитовый цилиндр.

На магнитопроводе обмотки располагают двумя способами: концентрическими и чередующимися. При первом способе на стержнях сначала располагают обмотки низкого напряжения НН, которые требуют меньшей изоляции относительно остова, а сверху — обмотку высшего напряжения ВН. Во втором случае расположение обмоток НН и ВН на стержне чередуется. Чередующиеся обмотки имеют меньшее магнитное сопротивление, но более сложны в из-

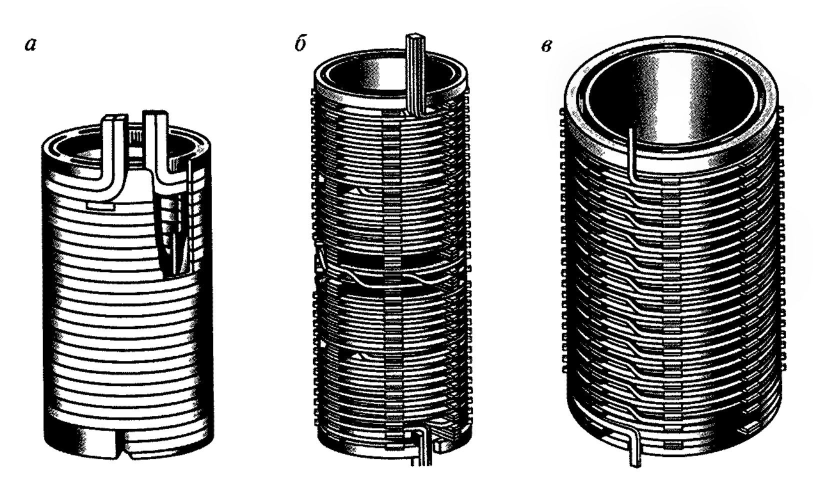


Рис. 4.6. Устройство концентрических обмоток:
а — цилиндрическая; *б* — винтовая; *в* — непрерывная спиральная

готовлении. Поэтому наиболее часто применяют концентрические обмотки, среди которых можно выделить следующие: многослойную цилиндрическую (рис. 4.6, *а*), винтовую (рис. 4.6, *б*) и непрерывную спиральную катушечную (рис. 4.6, *в*).

Цилиндрические однослойные и многослойные обмотки изготовляют из круглого или прямоугольного проводников. Между слоями прокладывают изоляцию из кабельной бумаги.

Винтовые одно- и многослойные обмотки наматывают из ряда параллельных проводников прямоугольного сечения, уложенных по винтовой линии и отделенных ряд от ряда изоляционными прокладками.

4.3. Режимы работы трансформаторов

Работа трансформатора под нагрузкой основывается на анализе двух предельных режимов его работы: холостого хода и короткого замыкания.

При *холостом ходе* (х.х.) трансформатора к зажимам первичной обмотки подводится номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута, т.е. ток вторичной обмотки равен нулю.

При режиме *короткого замыкания* (к.з.) трансформатора вторичная обмотка замкнута накоротко, а к первичной обмотке подво-

дится пониженное напряжение такой величины, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи. При этом напряжение вторичной обмотки равно нулю.

Режимы х.х. и к.з. являются, как указывалось выше, предельными режимами. Поэтому при рассмотрении любого нагрузочного режима можно рассматривать его как промежуточный между двумя предельными режимами и получить этот нагрузочный режим путем наложения одного предельного режима на другой.

Кроме того, холостой ход и короткое замыкание трансформатора позволяют определить ряд величин, имеющих важное значение для эксплуатации трансформатора. Например, при определении КПД нужно располагать потерями при холостом ходе трансформатора и при его коротком замыкании.

Процессы в трансформаторе при холостом ходе. Под действием приложенного напряжения по первичной обмотке протекает ток $I_1 = I_0$, составляющий 5—10 % от номинального значения. Этот ток можно разложить на две составляющие: активную I_{0a} и реактивную $I_{0\mu}$.

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0\mu}^2}. \qquad (4.12)$$

Активную составляющую фазного тока в трехфазных трансформаторах определяют как

$$I_{0a} = \frac{P_0}{3U_1}, \qquad (4.13)$$

в однофазном

$$I_{0a} = \frac{P_0}{U_1}. \qquad (4.14)$$

Активная мощность P_0 расходуется на покрытие потерь в трансформаторе.

Реактивная составляющая тока $I_{0\mu}$ создает основной магнитный поток и совпадает с ним по фазе.

Магнитный поток трансформатора, созданный реактивным током, имеет две составляющие: основной магнитный поток Ф, замыкающийся по магнитопроводу, и поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, магнитные силовые линии которого пронизывают только витки первич-

ной обмотки и замыкаются по воздуху. Поток Φ_σ индуктирует в первичной обмотке ЭДС $E_{\sigma 1}$ рассеяния

$$E_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1, \qquad (4.15)$$

где x_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для первичной обмотки трансформатора

$$U_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_0 r_1, \qquad (4.16)$$

откуда

$$U_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_1 x_1. \qquad (4.17)$$

Магнитный поток рассеяния, замыкающийся по воздуху, встречает большое магнитное сопротивление, поэтому очень мал по сравнению с основным магнитным потоком. Соответственно ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$ очень мала по сравнению с ЭДС $\dot{E}_1$. Следовательно, составляющими уравнения (4.17) $\dot{I}_0 r_1$ и $j\dot{I}_0 x_1$ можно пренебречь

$$U_1 \approx -E_1,\ E_2 = U_{20},$$

тогда

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2}. \qquad (4.18)$$

Таким образом, при холостом ходе можно определить *коэффициент трансформации.*

Потери в стали $P_{ст}$ трансформатора пропорциональны амплитудному значению B_m во второй степени.

$$P_{ст} \equiv P_0 \equiv B_m^2 \equiv \Phi_m^2 \equiv E_1^2. \qquad (4.19)$$

Потери в меди обмоток пропорциональны току во второй степени

$$P_м = I_0^2 r. \qquad (4.20)$$

Так как ток холостого хода очень мал, то потерями в меди можно пренебречь. Следовательно, при опыте холостого хода определяют *потери в стали.*

Процессы в трансформаторе при коротком замыкании. Короткое замыкание возникает в трансформаторе обычно вследствие каких-либо неисправностей, например, при повреждении изоляции,

ее пробое или ошибочных действий обслуживающего персонала. При коротком замыкании возникают большие токи, в 10–15 раз превышающие номинальные значения, вызывающие ударные динамические нагрузки, нагрев и повреждение изоляции.

Об условиях проведения опыта к.з. трансформатора указывалось выше. Подводимое напряжение обычно составляет 3–15 % от номинального значения. Схема для проведения опыта к.з. показана на рис. 4.7. Величина напряжения короткого замыкания $V_{к.з.}$ приводится в паспорте трансформатора. При опыте к.з. обмотку низшего напряжения замыкают накоротко (рис. 4.7, *а*), а к обмотке высшего напряжения подводят пониженное напряжение такой величины, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи. Для этой цели включен регулятор напряжения РНО, которым постепенно повышают напряжение до некоторого значения $U_{к.ном}$, при котором токи к.з. в обмотках трансформатора становятся равными номинальным токам в первичной ($I_{1к} = I_{1ном}$) и вторичной ($I_{2к} = I_{2ном}$) обмотках.

У трехфазного трансформатора (рис. 4.7, *б*) определяют значения напряжения и тока к.з. как средние для трех фаз:

$$U = \frac{U_{кA} + U_{кB} + U_{кC}}{3}; \qquad (4.21)$$

$$I_{1к} = \frac{I_{кA} + I_{кB} + I_{кC}}{3}. \qquad (4.22)$$

Коэффициент мощности при опыте к.з.

$$\cos\varphi_к = \frac{P_к}{3U_к I_{1к}}. \qquad (4.23)$$

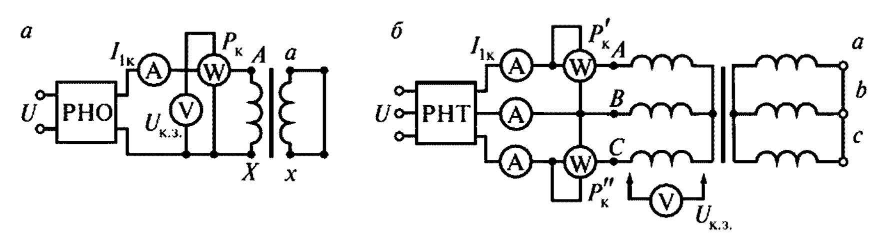


Рис. 4.7. Схемы опыта короткого замыкания для однофазного (*а*) и трехфазного (*б*) трансформаторов

Активную мощность трехфазного трансформатора при опыте к.з. измеряют методом двух ваттметров

$$P_к = P'_к + P''_к. \qquad (4.24)$$

При понижении напряжения уменьшится и магнитный поток Ф, что вызовет уменьшение намагничивающего тока. В этом случае уравнения трансформатора имеют вид

$$\dot{U}_{1к} - \dot{E}_{1к} = \dot{I}_{1к} Z_1; \qquad (4.25)$$

$$\dot{E}_{2к} - \dot{I}_{1к} Z_1 = 0; \qquad (4.26)$$

$$\dot{I}_{1к} + \dot{I}_{2к} = 0. \qquad (4.27)$$

Из (4.27) следует, что при коротком замыкании токи в обмотках приведенного трансформатора равны, но противоположны по направлению $\dot{I}_{1к} = -\dot{I}_{2к}$.

Ток короткого замыкания $\dot{I}_{1к}$

$$\dot{I}_{1к} = \frac{\dot{U}_1}{Z_к}. \qquad (4.28)$$

Напряжение короткого замыкания измеряется в процентах от номинального

$$u_к = \frac{U_к}{U_{ном}} \cdot 100\,\%. \qquad (4.29)$$

Согласно ГОСТ-11677, напряжение к.з. составляет 5,5—10,5 %. При столь малом напряжении намагничивающий ток и магнитный поток очень малы. Поэтому очень малыми будут и потери в стали, которыми можно пренебречь. Потери в меди обмоток $P_к = P_м = I^2_{ном} r_к$, где $I_{ном}$ — номинальный ток первичной обмотки. Таким образом, при опыте короткого замыкания можно определить *потери в меди обмоток.*

Работа трансформатора под нагрузкой подчиняется тем же законам, что и работа в режимах х.х. и к.з. Эти зависимости выражаются в форме уравнений, ЭДС и МДС или могут быть изображены с помощью векторных диаграмм.

При нагрузке по обмоткам протекают токи: по первичной — ток I_1, а по вторичной — ток I_2. Уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1. \qquad (4.30)$$

При холостом ходе МДС $I_0 w_1$ создает основной магнитный поток трансформатора Φ_{max}, который индуктирует ЭДС E_1. Падение напряжения в первичной обмотке $I_1 z_1$ очень мало по сравнению с приложенным напряжением. Поэтому приложенное напряжение уравновешивается ЭДС первичной обмотки, т.е. $U_1 \approx -E_1$. Следовательно, при неизменном напряжении сети будет неизменна как ЭДС E_1, так и амплитуда магнитного потока Φ_{max} при любой нагрузке.

При холостом ходе МДС $I_0 w_1$ создает основной магнитный поток трансформатора Φ_{max}, который индуктирует ЭДС E_1 в первичной и ЭДС E_2 во вторичной обмотках. При замыкании вторичной обмотки на сопротивление нагрузки $Z_н$ по ней будет протекать ток I_2. МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$ будет направлена встречно магнитному потоку Φ_{max}, ее создающему, стремясь уменьшить его. Но при уменьшении магнитного потока уменьшится и ЭДС E_1, что ведет к увеличению тока первичной обмотки. Ток увеличивается до такой величины, при которой МДС первичной обмотки $I_0 w_1$ компенсирует размагничивающее действие МДС $I_2 w_2$ вторичной обмотки.

Таким образом, уравнение равновесия МДС можно записать в векторной форме

$$\bar{I}_0 w_1 = \bar{I}_1 w_1 + \bar{I}_2 w_2; \qquad (4.31)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2'\right), \qquad (4.32)$$

где $\dot{I}_2' = \frac{I_2 w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}$.

Запишем уравнение ЭДС для вторичной обмотки

$$\dot{E}_2' - \dot{E}_{\sigma 2}' = \dot{I}_2' r_2 + \dot{I}_2' z_н'; \quad \dot{I}_2' z_н' = \dot{U}_2'; \quad \dot{E}_{\sigma 2}' = -j\dot{I}_2 x_2,$$

тогда

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' r_2' - j\dot{I}_2 x_2. \qquad (4.33)$$

По уравнениям (4.12), (4.32) и (4.33) можно построить векторную диаграмму (рис. 4.8).

Построение диаграммы начинают с вектора Φ_{max}, а ток I_0 опережает Φ_{max} на угол δ = 5—10°. Вектор ЭДС $\dot{E}_1$, как и $\dot{E}'_2$, отстает от потока Φ_{max} на угол 90°. Ток в первичной обмотке трансформатора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \frac{-\dot{I}'_2 w_2}{w_1},$$

поэтому на рис. 4.8 показан вектор тока $\dot{I}'_2$, сдвинутый на угол ψ_2 относительно вектора $\dot{E}_1$ (векторы $\dot{E}_1$ и $\dot{E}_2$ совпадают по направлению). Величина угла ψ_2 определяется по формуле

$$\psi_2 = \frac{\operatorname{arctg}\left(x'_2 + x_н\right)}{r'_2 + r'_н},$$

определяемой как характером внешней нагрузки, так и собственными сопротивлениями вторичной обмотки.

Зная $\dot{I}'_2$, можно изобразить вектор $(\dot{I}'_2 w_2)/w_1$ и получить вектор $\dot{I}_1$ как сумму векторов $\dot{I}_0$ и $(\dot{I}'_2 w_2)/w_1$. Найдя вектор $\dot{I}_1$, можно определить значения векторов $\dot{I}_1 r_1$ и $j\dot{I}_1 x_1$ и построить искомый вектор напряжения $\dot{U}_1$ как сумму трех составляющих: вектора — $\dot{E}_1$ и падений напряжения в обмотках $\dot{I}_1 r_1$ и $j\dot{I}_1 x_1$.

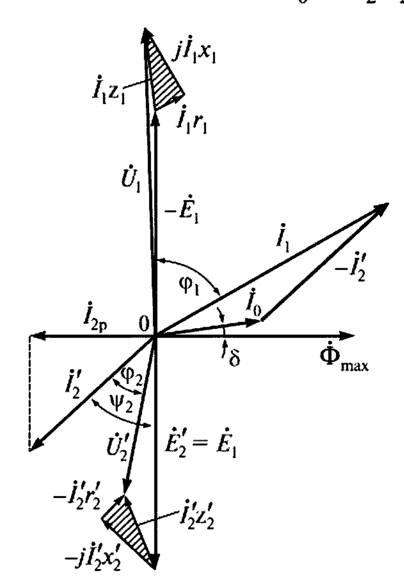


Рис. 4.8. Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке

Для построения вектора напряжения $\dot{U}_2$ необходимо из вектора $\dot{E}_2$ вычесть векторы падений напряжений $j\dot{I}_2 x_2$ и $\dot{I}'_2 r'_2$. Построим вектор $\dot{I}'_2 z'_2$, получим треугольник внутренних падений напряжений во вторичной цепи. Затем из точки 0 проводим вектор $\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}'_2 z'_2$, который опережает по фазе ток $\dot{I}'_2$ на угол $\varphi = \operatorname{arctg}(x'_н/r'_н)$.

КПД *трансформатора.* Мощность P_1, подаваемая на первичную обмотку трансформатора, равна мощности P_2, снимаемой со вторичной обмотки. Часть мощности теряется в

трансформаторе и в соответствии с законом сохранения энергии преобразуется в теплоту.

КПД трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой им из сети

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\,\%; \tag{4.34}$$

$$P_1 - P_2 = \Delta P, \tag{4.35}$$

где ΔP — сумма потерь в трансформаторе.

Подставив (4.35) в (4.34), получим

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}. \tag{4.36}$$

Выразим изменение нагрузки трансформатора через коэффициент нагрузки $K_{нг}$

$$K_{нг} = \frac{I_2}{I_{ном}}; \tag{4.37}$$

$$P_2 = K_{нг} P_{2ном} \cos \varphi_2, \tag{4.38}$$

где $P_{2ном}$ — номинальная мощность трансформатора;
I_2 — ток вторичной обмотки трансформатора;
$I_{ном}$ — номинальный ток трансформатора;
$\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности.

Потери мощности в трансформаторе — это потери в меди $P_м$ и потери в стали $P_{ст}$

$$\Delta P = P_{ст} + P_м. \tag{4.39}$$

Так как при работе трансформатора частота тока сети и амплитуда магнитной индукции неизменны, то потери в стали постоянны, они не зависят от нагрузки трансформатора и равны потерям холостого хода

$$P_{ст} = P_0. \tag{4.40}$$

Потери в меди зависят от тока нагрузки и являются переменными потерями $P_м = K_{нг}^2 P_к$.

Активная мощность P_2 на выходе вторичной обмотки трехфазного трансформатора

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2 = K_{нг} S_{ном} \cos\varphi_2. \tag{4.41}$$

Подставив значения формул (4.38), (4.40), (4.41) в формулу (4.36), получим

$$\eta = \frac{K_{нг} S_{ном} \cos\varphi_2}{K_{нг} S_{ном} \cos\varphi_2 + P_{0ном} + K_{нг}^2 P_к} \cdot 100\,\%. \tag{4.42}$$

Из анализа выражения (4.42) следует, что КПД трансформатора зависит как от величины $K_{нг}$, так и от характера ($\cos\varphi_2$) нагрузки.

Практически КПД трансформатора очень высок. Так, для трансформатора малых мощностей до 1000 ВА КПД составляет 85—95 %; для трансформаторов больших мощностей — 95—99,5 %.

Под ***внешней характеристикой трансформатора*** понимают зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки U_2 от тока этой обмотки I_2 при условии, что $\cos\varphi$, первичное напряжение U_1 и частота f постоянны.

При холостом ходе, когда $I_2 = 0$, напряжение на выводах вторичной обмотки равно ЭДС этой обмотки E_{20}. Как уже было сказано, напряжение для вторичной обмотки при $U_{1ном}$ принимается за номинальное $E_{20} = U_{2ном}$.

При нагрузке трансформатора появляется ток во вторичной обмотке и увеличивается ток в первичной обмотке. Эти токи вызывают падение напряжение в обмотках, в результате чего напряжение на выводах вторичной обмотки будет изменяться. Если пренебречь намагничивающим током I_0 вследствие его относительной малости, то в режиме нагрузки при росте тока нагрузки I_2 напряжение на зажимах трансформатора будет уменьшаться, но это только при активно-индуктивной нагрузке. При росте тока при активно-емкостной нагрузке напряжение может увеличиться (рис. 4.9).

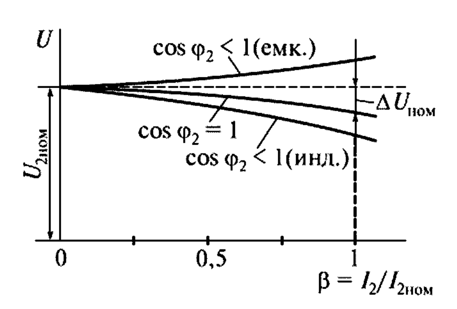


Рис. 4.9. Внешние характеристики трансформатора при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках

Наклон кривых внешних характеристик зависит от характера нагрузки трансформатора ($\cos \varphi_2$).

Арифметическая разность вторичных напряжений при холостом ходе и токе I_2 называется *изменением напряжения трансформатора*. Его принято выражать в процентах номинального напряжения

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{2н} - U_2'}{U_{2н}} \cdot 100 = \frac{U_{1н} - U_2'}{U_{1н}} \cdot 100. \qquad (4.43)$$

Значение $\Delta U\%$ можно найти, изменяя непосредственно нагрузки трансформатора.

Регулирование напряжения трансформаторов. С помощью трансформатора можно регулировать величину выходного напряжения, для чего в обмотке трансформатора делают ответвления. Ответвления обмоток могут быть как на вторичной стороне, так и на первичной. У тяговых трансформаторов переключение контактов ответвлений выполняют, как правило, под нагрузкой. Последовательность переключения с контакта X_1 на контакт X_3 обмотки трансформатора показана на рис. 4.10.

В исходном положении оба подвижных контакта $П_1$ и $П_2$ находятся на одном ответвлении X_1, а контакты $К_1$ и $К_2$ замкнуты (рис. 4.10, *а*). В положении 1 размыкается контакт $К_1$, а контакт $П_1$ в обесточенном состоянии переключается на контакт ответвления X_3. После этого замыкается контакт $К_1$ (положение 2). Ин-

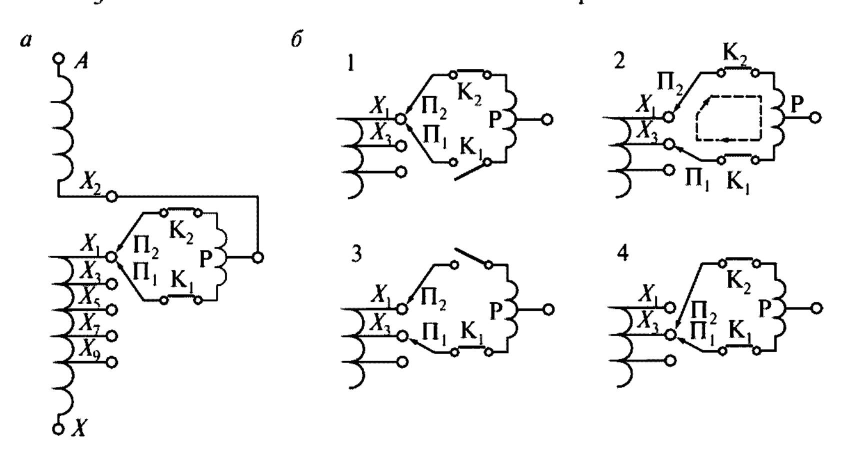


Рис. 4.10. Переключение контактов трансформатора под нагрузкой

дуктивное сопротивление (реактор) ограничивает ток к.з. секции обмотки трансформатора X_1—X_3. В положении 3 размыкается контакт $К_2$ и происходит переключение контакта $П_2$ на контакт ответвления X_3. В положении 4 контакт $К_2$ замкнут и оба контакта $П_1$ и $П_2$ находятся на ответвлении X_3.

Автотрансформатором называют такой трансформатор, у которого обмотка низшего напряжения электрически (гальванически) связана с обмоткой высшего напряжения. Как и трансформаторы, автотрансформаторы также могут быть понижающими и повышающими.

В понижающем автотрансформаторе (рис. 4.11) первичное напряжение подводится к зажимам A и X; вторичной обмоткой является часть первичной обмотки a и x, причем зажимы x и X совмещены.

Так как в каждом витке обмотки индуктируется одинаковая ЭДС $E = 4{,}44\Phi_m f$, то напряжение на зажимах a—x

$$U_2 = 4{,}44 f w_{ax} \Phi_m = \frac{U_1 w_{ax}}{w_{AX}} = \frac{U_1}{k},$$

где w_{AX} и w_{ax} — числа витков, включенных соответственно между зажимами A и X, a и x;

$k = w_{AX}/w_{ax}$ — коэффициент трансформации.

Если точку a сделать подвижной, то можно регулировать величину выходного напряжения U_2.

Достоинством автотрансформаторов является то, что он имеет только одну обмотку, поэтому его стоимость ниже, чем у двухобмоточного. Кроме того, его вторичное напряжение можно регулировать от 0 до $U_{2н}$.

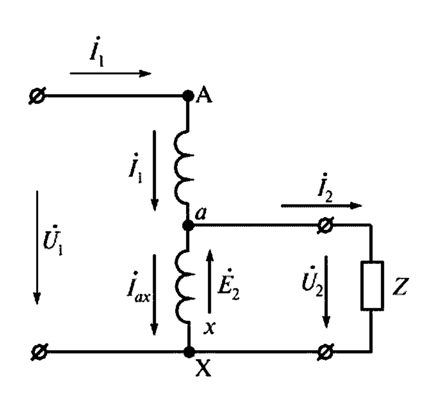


Рис. 4.11. Схема автотрансформатора

К его недостаткам следует отнести то, что вторичная цепь у них электрически соединена с первичной. Поэтому на вторичной обмотке такой же высокий потенциал, что и на первичной.

Автотрансформаторы большой мощности редко применяют при $k > 2$ во избежание возникнове-

ния опасных перенапряжений во вторичной цепи при появлении опасных атмосферных и коммутационных перенапряжений в первичной цепи.

Многообмоточные трансформаторы применяют в автоматических устройствах и приборах для осуществления связи между несколькими цепями или системами переменного тока разных напряжений. Конструкция магнитопровода ничем не отличается от обычного двухобмоточного. Количество обмоток определяет и количество коэффициентов трансформации. Например, для трехобмоточного трансформатора, имеющего одну первичную и две вторичные обмотки коэффициенты трансформации, составляют $k_{12} = w_1/w_2 = E_1/E_2$; $k_{13} = w_1/w_3 = E_1/E_3$; $k_{23} = w_2/w_3 = E_2/E_3$.

Опытным путем коэффициенты трансформации определяют из опыта холостого хода, т.е. так же, как и в двухобмоточном трансформаторе.

Реакторы и реактивные катушки со стальными магнитопроводами не являются трансформаторами, однако по своему устройству одинаковы с ними. Они имеют только одну обмотку и применяются в качестве токоограничивающих устройств или для сглаживания пульсаций выпрямленного тока. При больших мощностях такие реактивные катушки называют реакторами.

Импульсные трансформаторы применяют в устройствах автоматики и электроники для передачи импульсных сигналов малой длительности. Мощность импульсов, передаваемая современными трансформаторами, достигает нескольких ватт, их длительность колеблется от долей микросекунды до нескольких сотен микросекунд.

Магнитопроводы импульсных трансформаторов имеют тороидальную форму, изготовляют их из материалов с улучшенными магнитными свойствами при высоких частотах — железоникелевых сплавов типа пермаллой и др. Для снижения емкостных связей осуществляют специальную укладку проводов, обеспечивающую симметричное распределение емкостей, применяют систему металлических экранов и пр.

Сварочные трансформаторы. В настоящее время существует большое разнообразие сварочных устройств, отличающихся друг от друга как параметрами и размерами, так и конструкцией и способом регулирования сварочного тока.

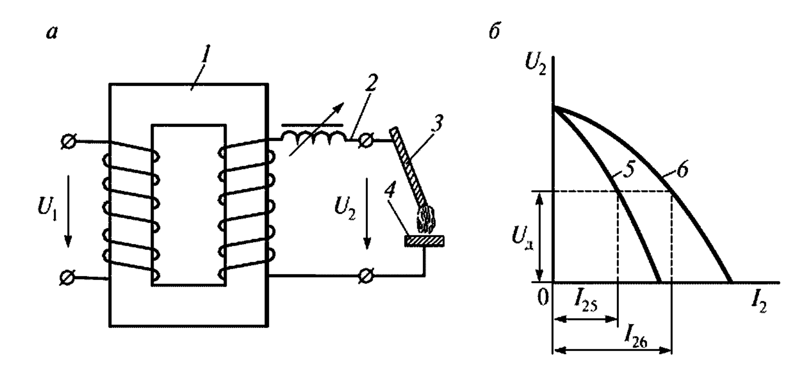


Рис. 4.12. Электрическая схема (*а*) и внешние характеристики (*б*) сварочного трансформатора:
1 — трансформатор; *2* — дроссель с переменной индуктивностью; *3* — электрод; *4* — свариваемая деталь; *5*, *6* — внешние характеристики

В качестве примера рассмотрим сварочный трансформатор для ручной электродуговой сварки, обеспечивающий надежное и устойчивое горение дуги. Вторичное напряжение такого трансформатора при холостом ходе 60—75 В. Такое напряжение необходимо для надежного зажигания дуги и при номинальной нагрузке уменьшается до 30 В. Номинальный режим работы сварочного трансформатора близок к режиму к.з. Поэтому для ограничения тока к.з. и устойчивого горения дуги такой трансформатор должен иметь крутопадающую внешнюю характеристику, а цепь сварочного тока должна обладать значительной индуктивностью. Для регулирования сварочного тока значение этой индуктивности должно быть регулируемым. Для этой цели последовательно с вторичной обмоткой трансформатора (рис. 4.12, *а*) включают дроссель *2* с переменной индуктивностью. Регулируя величину зазора в его магнитопроводе, изменяют его индуктивность, а следовательно и наклон внешней характеристики *5* или *6* (рис. 4.12, *б*) и величину тока дуги I_{25} или I_{26}, соответствующую напряжению горения дуги $U_д$.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия трансформатора?
2. Какие паспортные данные имеются на табличке, укрепленной на трансформаторе?
3. Какие способы охлаждения применяются в трансформаторах?

4. Какова конструкция магнитопровода?
5. Какие виды обмоток применяются в трансформаторах?
6. Какие изоляционные материалы применяют в обмотках?
7. Какие параметры определяют при опыте холостого хода?
8. Какие параметры определяют при опыте короткого замыкания?
9. Как производится регулирование выходного напряжения трансформатора?
10. Что представляет собой импульсный трансформатор?
11. Каковы достоинства и недостатки автотрансформатора?
12. Каково устройство автотрансформатора?
13. Что представляет собой реактор и каково его назначение?
14. Где применяют многообмоточные трансформаторы?
15. Какие требования предъявляются к сварочным трансформаторам?
16. Каким образом получают крутопадающую внешнюю характеристику сварочного трансформатора?

Глава 5. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

5.1. Классификация и принцип действия

Электромашинные преобразователи предназначены для преобразования постоянного тока в однофазный переменный или в многофазный, а также для преобразования переменного тока одной частоты в переменный ток другой частоты и для преобразования постоянного тока одного напряжения в постоянный ток другого.

К электромашинным преобразователям относятся: двигатель-генераторы, электромашинные усилители, одноякорные и двухъякорные преобразователи.

Двигатель-генератор (рис. 5.1) представляет собой две электрические машины (двигатель и генератор), валы которых жестко соединены между собой. Если в качестве двигателя используется электродвигатель постоянного тока, а в качестве генератора — трехфазный генератор, то происходит преобразование постоянного тока в трехфазный переменный.

Комбинируя род тока двигателя и генератора, можно производить преобразование постоянного тока в переменный с частотой, отличающейся от промышленной, а также переменного тока — в постоянный, переменного тока одной частоты — в переменный ток другой частоты.

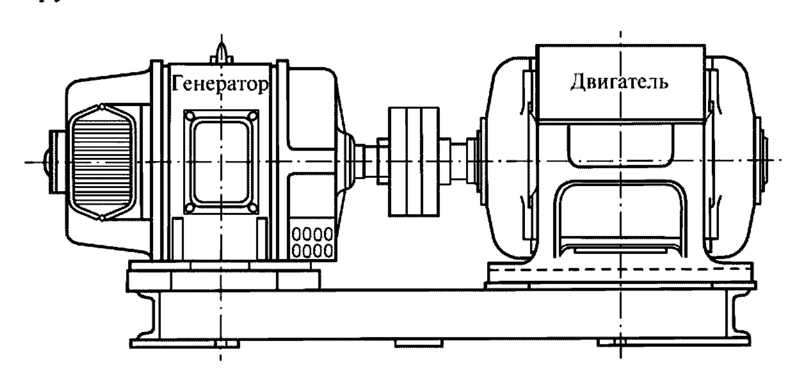


Рис. 5.1. Двигатель-генератор

Коэффициент полезного действия двигатель-генератора $\eta_{дг}$, состоящий из КПД двигателя и КПД генератора:

$$\eta_{дг} = \eta_д \eta_г, \tag{5.1}$$

где $\eta_д$ — КПД двигателя;
$\eta_г$ — КПД генератора.

Так как КПД двигателя или генератора всегда меньше единицы, то, как видно из формулы (5.1), КПД двигатель-генератора будет меньше наименьшего из сомножителей.

5.2. Конструкции электромашинных преобразователей, их достоинства и недостатки

Одноякорный преобразователь представляет собой электрическую машину постоянного тока с коллектором на одном конце вала и с контактными кольцами, помещенными на другом его конце.

На внутренней стороне корпуса закреплены главные полюса с обмотками возбуждения, получающие питание от коллектора преобразователя.

Как и в любой электрической машине, по обмотке якоря протекает переменный ток. Поэтому, если соединить точки обмотки якоря, отстоящие друг от друга на 120°, и подключить их к трем контактным кольцам, расположенным на валу, то получим на контактных кольцах трехфазный ток (рис. 5.2).

Преобразователь **ПО300В** защищенного исполнения имеет два главных полюса *7* (рис. 5.3) с обмотками последовательного и параллельного возбуждения *6*. Якорная обмотка постоянного тока *9* независима от обмотки переменного тока *5*, обе эти обмотки заложены в одни и те же пазы сердечника якоря *8* и выведены соответственно к коллектору *10* и контактным кольцам *4*. Вентиляция осуществляется центробежным

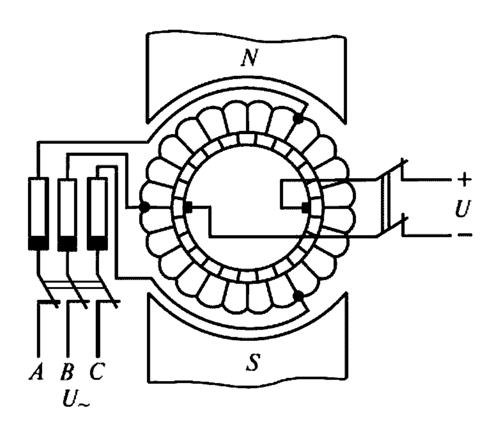


Рис. 5.2. Схема одноякорного преобразователя

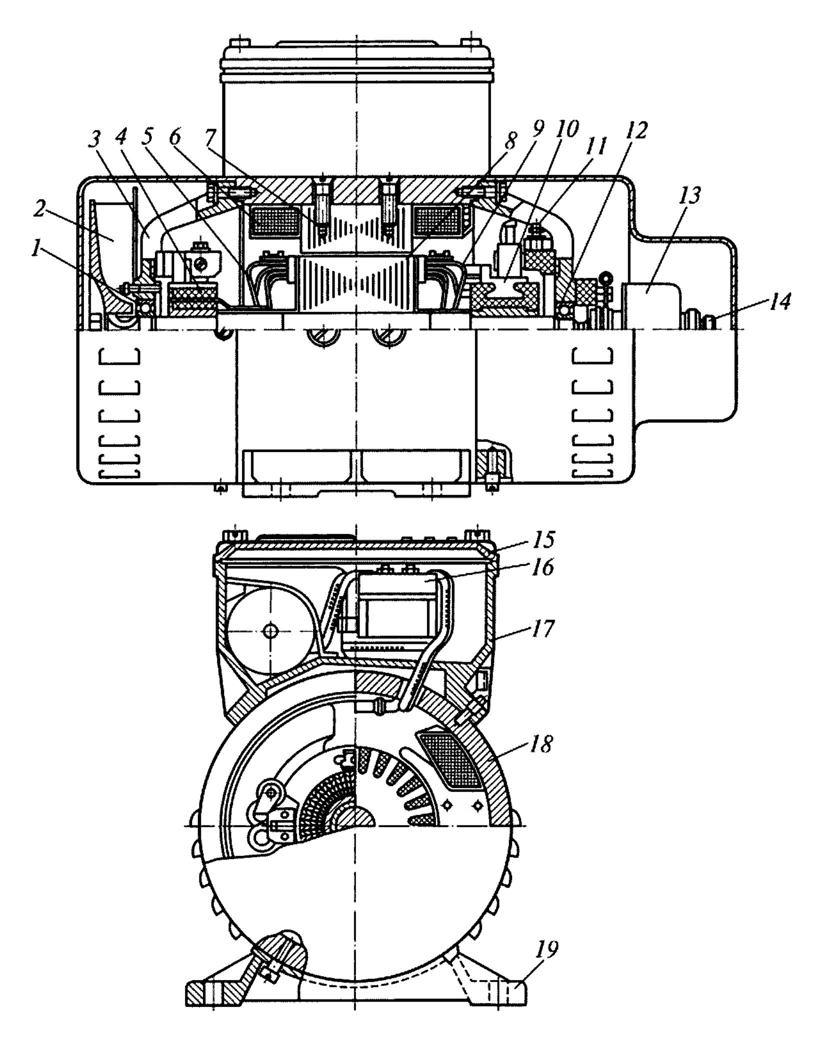


Рис. 5.3. Преобразователь ПО300В

вентилятором *2*, расположенным за подшипниковым щитом *3*. В подшипниковых щитах расположены подшипники *1* и *12* и траверса со щеткодержателями *11*. Для крепления преобразователя к фундаменту снизу к станине *18* приварены опорные лапы *19*. На верхней части преобразователя крепится коробка фильтров *17* с коробкой выводов *16*. Коробка фильтра закрыта крышкой *15*. Цент-

робежный регулятор частоты вращения *13* укреплен на конце вала *14* и поддерживает стабильную частоту вращения якоря.

К ***достоинствам электромашинных преобразователей*** следует отнести:

– простоту конструкции;

– отсутствие переменной составляющей в получаемом постоянном токе;

– простоту обслуживания, не требующую дорогостоящих устройств и высокой квалификации персонала.

К их ***недостаткам*** относятся:

– наличие коллекторно-щеточного узла, что значительно снижает надежность работы;

– сравнительно более высокая стоимость обслуживания и ремонта (замена изношенных щеток и их стоимость; своевременное смазывание вращающихся частей и стоимость смазочных материалов);

– дополнительный шум от работы электромашинного преобразователя;

– относительно малая надежность работы.

В то же время ***статические преобразователи*** обладают перед электромагнитными несомненными преимуществами, к которым относятся:

– отсутствие вращающихся частей;

– относительно высокая надежность;

– меньшие затраты на обслуживание и ремонт.

Среди недостатков статических преобразователей следует отметить их сравнительно высокую стоимость, а также потребность в более высокой квалификации обслуживающего персонала и дорогостоящих устройств для их обслуживания и ремонта.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение электромашинных преобразователей?
2. Что собой представляет двигатель-генератор?
3. Почему КПД двигатель-генератора всегда меньше, чем КПД отдельно двигателя или генератора?
4. Как устроен одноякорный преобразователь?
5. Каковы достоинства и недостатки электромашинных преобразователей и статических преобразователей?

Глава 6. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Магнитный усилитель представляет собой электромагнитный аппарат, имеющий ферромагнитный сердечник с обмотками и предназначенный для управления выходным сигналов большой мощности посредством одного или нескольких сигналов малой мощности. Принцип действия магнитного усилителя основан на изменении индуктивности катушки с ферромагнитным сердечником при подмагничивании ее постоянным током.

Классифицируют магнитные усилители по нескольким признакам:

– по числу обмоток управления — с одной или с несколькими обмотками;

– по связи между обмотками — с прямой связью и с обратной связью;

– по подмагничиванию — с подмагничиванием и без подмагничивания.

Кроме того, существуют магнитные усилители с насыщающимися реакторами и с самонасыщением.

Современные магнитные усилители выполняются, как правило, на двух одинаковых сердечниках кольцевой, П- или Ш-образной формы, на каждом из которых расположены одинаковые рабочие обмотки, причем их общее число должно быть четным. Для предотвращения наведения ЭДС взаимоиндукции в обмотках управления под действием переменного магнитного потока рабочей обмотки она соединяется своими частями встречно-последовательно. Поэтому магнитный поток и индуктируемая ЭДС рабочих обмоток будет в противофазе.

6.1. Конструкции и принципы действия магнитных усилителей

Магнитные усилители с насыщающимися реакторами. В таком магнитном усилителе используют два насыщающихся реактора L_1 и L_2 (рис. 6.1, *а*). Каждый из них выполнен в виде катушки (ра-

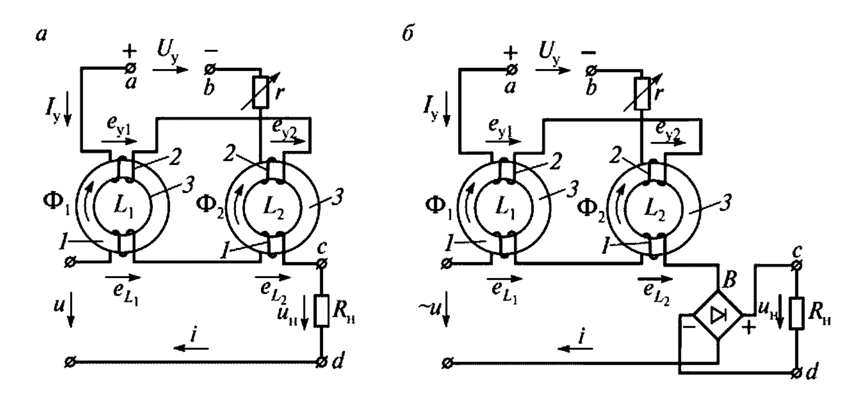


Рис. 6.1. Магнитные усилители с насыщающимися реакторами с выходом на переменном (*а*) и постоянном (*б*) токе

бочей обмотки) *1* с ферромагнитным сердечником *3* и подмагничивающей обмоткой *2*, по которой протекает постоянный ток $I_у$ (ток управления).

Рабочие обмотки *1* реакторов L_1 и L_2 включены согласованно, чтобы переменные ЭДС e_{L_1} и e_{L_2}, индуктированные в них, были направлены встречно друг другу и взаимно уничтожались.

Входом магнитного усилителя, на который подается управляющий сигнал $U_у$, являются зажимы *a* и *b* обмоток управления обоих реакторов. Выходом усилителя служат точки *c* и *d*, к которым подключена нагрузка $R_н$. Если нагрузка питается переменным током, то она включается последовательно с рабочими обмотками L_1 и L_2. Такой магнитный усилитель называют усилителем с выходом на переменном токе. Если нагрузка $R_н$ рассчитана на питание постоянным током, то ее включают через выпрямитель *B* (рис. 6.1, *б*). В этом случае магнитный усилитель является усилителем с выходом на постоянном токе.

Источником питания магнитного усилителя служит сеть переменного тока или трансформатор, подключенный к питающей сети.

Ток в рабочей цепи магнитного усилителя определяется формулой

$$I_р = \frac{U_р}{\sqrt{X^2 + R^2}},$$

где R — активное сопротивление рабочей цепи, включая и нагрузку;
X — индуктивное сопротивление рабочей обмотки.

Индуктивное сопротивление рабочей обмотки $X = \omega L_р$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота питания рабочей цепи.

Магнитный усилитель работает следующим образом. Когда на вход усилителя не подается управляющий сигнал (напряжение на входе усилителя $U_р$ и ток управления $I_у$ равны нулю), сердечники реакторов не насыщены и рабочие обмотки *1* имеют большое индуктивное сопротивление. Поэтому ток в цепи нагрузки будет мал. Его называют начальным или током холостого хода. Напряжение на нагрузке $U_н$ (выходное напряжения) будет также мало, так как бóльшая часть напряжения U приходится на падение напряжения IX_L в рабочих обмотках. Следовательно, и мощность, поступающая к нагрузке от источника питания, будет малой.

Если на обмотку управления подать постоянный ток $I_у$, то изменится насыщение сердечника, вследствие чего изменится его магнитная проницаемость и индуктивное сопротивление X_L. Изменение индуктивного сопротивления вызовет изменение тока в рабочей обмотке и падение напряжения на нагрузке $R_н$.

Для магнитного усилителя справедливо такое же уравнение магнитодвижущих сил, что и для трансформатора

$$F_р = F_у,$$

где $F_р = Iw_р$ — МДС рабочей обмотки;

$F_у = I_у w_у$ — МДС обмотки управления;

$w_р$ и $w_у$ — число витков рабочей обмотки и обмотки управления.

Коэффициент усиления по мощности равен отношению выходной мощности $P_{вых}$ к входной мощности $P_{вх}$

$$K = \frac{P_{вых}}{P_{вх}}.$$

Коэффициент усиления магнитных усилителей составляет от нескольких десятков до нескольких сотен единиц.

Магнитный усилитель без обратной связи представляет собой электромагнитный аппарат с ферромагнитным сердечником и обмотками. Он предназначен для управления выходным сигналом большой мощности посредством одного или нескольких входных сигналов малой мощности.

Конструктивно магнитный усилитель без обратной связи состоит из сердечника, выполненного из ферромагнитных материалов (же-

лезо-кремниевых или никелевых сплавов) и обмоток переменного и постоянного тока (рис. 6.2). Обмотки переменного тока называют рабочими обмотками (ОР), обмотки постоянного тока — обмотками управления или подмагничивания (ОУ).

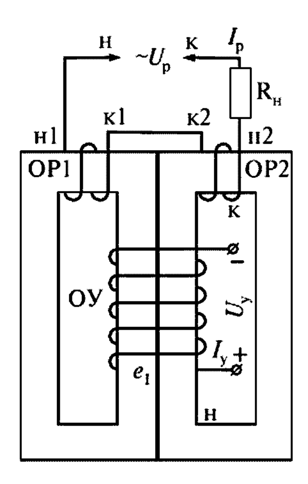


Рис. 6.2. Схема магнитного усилителя без обратной связи

На обмотку управления подают постоянный ток $I_у$ (входной сигнал), а на зажимы рабочей обмотки включают нагрузку $R_н$. Рабочая обмотка получает питание от источника переменного тока.

Обычно магнитные усилители состоят из двух одинаковых сердечников, чаще всего тороидальной формы, на каждом из которых размещены одинаковые рабочие обмотки. Для устранения наводки ЭДС взаимоиндукции в обмотках управления от переменного магнитного потока обе части рабочей обмотки соединяют встречно и последовательно. В этом случае магнитный поток и индуктированная ЭДС будут в противофазе. Это позволяет применить общую обмотку управления, охватывающую оба сердечника.

В ТПС магнитные усилители с самоподмагничиванием применяют в блоках автоматики; зарядных агрегатах; в цепях питания обмоток возбуждения.

Обратные связи в магнитных усилителях. Магнитные усилители чаще всего выполняют с обратными связями, благодаря чему обеспечивается стабильность работы усилителя и повышение его коэффициента усиления.

Обратной связью в усилителе называется воздействие выходного тока или напряжения на его вход. Она может быть внешней и внутренней, положительной или отрицательной.

Если при возрастании тока нагрузки или напряжения на нагрузке обмотка обратной связи усиливает действие входного сигнала, то обратная связь называется *положительной.* Ее используют для повышения коэффициента усиления. Если же при возрастании тока или напряжения на нагрузке обмотка обратной связи ослабляет действие входного сигнала, то связь называется *отрицатель-*

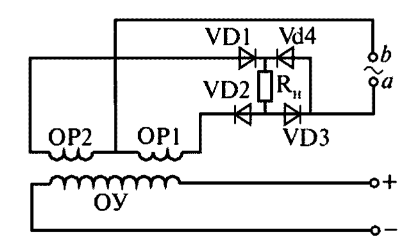


Рис. 6.3. Схема магнитного усилителя с обратной связью

ной. Такую связь вводят в системы автоматического регулирования для повышения устойчивости их работы.

Обычно обмотку обратной связи включают через выпрямитель, который присоединяют параллельно или последовательно с нагрузкой. В первом случае ток $I_{ос}$ в обмотке обратной связи будет пропорционален выходному напряжению $U_н$ (обратная связь по напряжению), во втором — току $I_н$ в цепи нагрузки (обратная связь по току). Если нагрузка питается пульсирующим (выпрямленным) током, то можно применить один общий выпрямитель для питания нагрузки и создания обратной связи.

В ***магнитном усилителе с обратной связью*** (рис. 6.3) рабочие обмотки включают последовательно с выпрямителем внутри моста. При этом ток в рабочих обмотках будет пульсирующим, так как он изменяется только по значению. Ток протекает по цепи: точка *а* (предположим, что у нее положительный потенциал), диод VD3, резистор нагрузки $R_н$, диод VD2, обмотка OP1 к точке *б*. Во второй полупериод ток пройдет от точки *б* по обмотке OP2, диоду VD1, $R_н$, VD4 к точке *а*.

Протекающий ток можно рассматривать как результат сложения переменного тока с постоянным током определенного значения. Постоянная составляющая тока, протекая по рабочим обмоткам, подмагничивает усилитель. Бóльшая часть мощности для подмагничивания забирается из цепи переменного тока, что приводит к резкому увеличению коэффициента усиления.

Магнитный усилитель с обратной связью иногда называют *амплистатом*.

6.2. Измерительные трансформаторы постоянного тока и напряжения

Трансформаторы постоянного тока. Так как в цепях постоянного тока невозможно использовать обычные трансформаторы, для косвенных измерений постоянного тока применяют специальные устройства, которые выполняют такую же роль, как и трансформа-

торы тока. Поэтому их условно называют трансформаторами постоянного тока (ТПТ). Их работа также базируется на принципах магнитного усилителя.

Назначение ТПТ — получить ток в измерительной цепи, пропорциональный току в силовой цепи, и изолировать измерительную цепь от силовой.

Латунный стержень ТПТ *1* (рис. 6.4), представляющий собой как бы его первичную обмотку, пропущен через два тороидальных сердечника А1 и А2. Обычно в ТПТ используют два тороида (а не один), причем их магнитные потоки направлены в разные стороны. Это делают для того, чтобы по возможности исключить влияние магнитных потоков рассеяния, которые могли бы нарушить пропорциональность первичного и вторичного токов. Вторичные обмотки тороидов, включенные встречно по отношению друг к другу, получают питание от неизменного по величине напряжения трансформатора Тр через резистор R. Величина тока i_m в их цепи зависит от сопротивления R и индуктивного сопротивления обмоток тороидов. Если силовой ток I_1 увеличивается, то происходит намагничивание и насыщение тороидальных сердечников, в результате чего их индуктивное сопротивление уменьшается, а ток i_m увеличивается. Таким образом, с увеличением постоянного тока I_1 увеличивается переменный ток i_m. Для того чтобы получить в измерительной цепи постоянный ток, к резистору R (напряжение на нем пропорционально току i_m) подсоединяют выпрямительный мост, на выходе которого получают выпрямленный ток i_2, также пропорциональный измеряемому току I_1.

Если силовой ток уменьшается, то вследствие увеличения индуктивного сопротивления вторичных обмоток тороидов уменьшаются токи i_m и i_2.

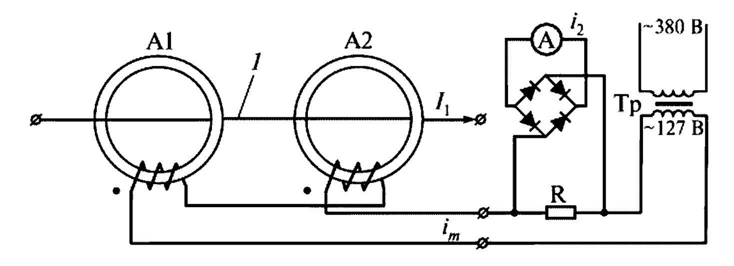


Рис. 6.4. Схема трансформатора постоянного тока

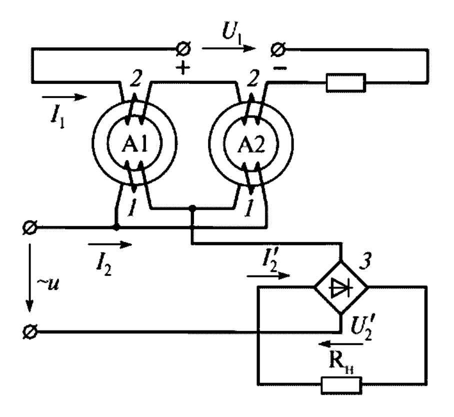


Рис. 6.5. Схема трансформатора постоянного напряжения

Таким образом, работа ТПТ основана на изменении индуктивного сопротивления обмоток тороидов при их насыщении под действием измеряемого силового тока.

Трансформаторы постоянного напряжения (ТПН) по принципу действия такие же, как и ТПТ. Предназначен ТПН для измерения напряжения в измерительной цепи.

Как и ТПТ, трансформатор постоянного напряжения состоит из двух тороидальных сердечников А1 и А2 (рис. 6.5), выполненных из железо-никелевого сплава — пермаллоя, на каждом из которых намотана рабочая обмотка *1*. Рабочие обмотки обоих тороидов соединены между собой встречно. Управляющая обмотка *2* охватывает оба сердечника. Поэтому ток подмагничивания трансформатора пропорционален измеряемому напряжению. Таким образом, с увеличением напряжения пропорционально возрастает ток трансформатора выходного напряжения. По нагрузке $R_н$ протекает постоянный ток благодаря выпрямителю *3*.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют магнитные усилители?
2. Каково назначение магнитных усилителей?
3. Каково назначение трансформаторов постоянного тока?
4. Каков принцип действия трансформатора постоянного тока?
5. Каково назначение трансформаторов постоянного напряжения?
6. Каков принцип действия трансформатора постоянного напряжения?
7. Дайте определение обратной связи.
8. Что представляют собой положительная и отрицательная обратные связи?
9. Как протекает ток в магнитном усилителе с обратной связью?

Глава 7. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

7.1. Структура системы технического обслуживания

Для более эффективного использования тепловозов, дизель-поездов и рельсовых автобусов в Российской Федерации введена в действие система технического обслуживания и ремонта локомотивов. Эта система регламентирует виды технических обслуживаний и ремонтов, среднесетевые нормативы межремонтных периодов, технических обслуживаний, допускаемый процент неисправных локомотивов, дизель-поездов и рельсовых автобусов.

Техническое обслуживание — это система мероприятий профилактического характера, предназначенная для снижения интенсивности изнашивания деталей, сборочных единиц и агрегатов тепловозов, дизель-поездов и рельсовых автобусов; своевременного выявления неисправностей; предупреждения отказов путем диагностирования без разборки; поддержания тепловозов, дизель-поездов и рельсовых автобусов в работоспособном состоянии, обеспечивающем их бесперебойную работу и безопасность движения в соответствии с требованиями Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации.

В соответствии с «Положением о системе технического обслуживании и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» от 17.01.2005 г. № 3р предусмотрены следующие виды планового технического обслуживания и ремонта:

– техническое обслуживание ТО-1; ТО-2; ТО-3; ТО-4; ТО-5а; ТО-5б; ТО-5в; ТО-5г;

– текущий ремонт ТР-1; ТР-2; ТР-3;

– средний ремонт СР;

– капитальный ремонт КР.

Технические обслуживания ТО-1, ТО-2 и ТО-3 являются периодическими и предназначены для контроля технического состояния узлов и систем локомотива в целях предупреждения отказов в эксплуатации. Постановка локомотивов на техническое обслуживание ТО-4, ТО-5а, ТО-5б, ТО-5в, ТО-5г планируется по необходимости.

Техническое обслуживание ТО-1 выполняется локомотивной бригадой при приемке-сдаче и экипировке локомотива, при остановках на железнодорожных станциях; ТО-2 — работниками пунктов технического обслуживания локомотивов (ПТОЛ); ТО-3 — в депо приписки локомотивов.

Техническое обслуживание ТО-4 предназначено для поддержания профиля бандажей колесных пар в пределах, установленных Инструкцией по формированию, ремонту и содержанию колесных пар.

Техническое обслуживание ТО-5а проводится с целью подготовки локомотива к постановке в запас или резерв железной дороги; ТО-5б — при подготовке локомотива к отправке в недействующем состоянии; ТО-5в — при подготовке к эксплуатации локомотива, прибывшего в недействующем состоянии, после постройки, после ремонта вне локомотивного депо приписки или после передислокации; ТО-5г — при подготовке локомотива к эксплуатации после содержания в запасе (резерве железной дороги).

При техническом обслуживании и текущих ремонтах электрических машин обращают особое внимание на чистоту и исправность: коллекторов, контактных колец, щеток, щеткодержателей, изоляции, межкатушечных соединений, выводных проводов, уплотнений крышек люков, токопроводящих проводов, а также на температуру нагрева подшипников. Поверхности электрических машин обдувают сухим чистым воздухом давлением не более 0,18—0,2 МПа. Перед продувкой наружную поверхность очищают от загрязнений.

Для удаления прилипших загрязнений допускается использовать жесткие волосяные щетки, а также притупленные деревянные и фибровые скребки.

Для очистки изолированных поверхностей применяют чистые безворсовые салфетки, при необходимости смоченные в бензине, спирте или других моющих средствах, рекомендованных ВНИИЖТ и отжатые, чтобы не допускать подтеков жидкости. Не допускается попадание влаги, нефтепродуктов, растворителей на изоляционные поверхности и токоведущие части, так как это приводит к постепенному разбуханию, растрескиванию и пробою изоляции, также к нарушению коммутации электрических машин.

В процессе детального осмотра контролируют качество пайки обмотки якоря в «петушках» коллектора, соединение катушек полюсов и выводных проводов, состояние бандажей и пазовых клиньев

якоря, эмалевых покрытий, чистоту дренажных отверстий тягового электродвигателя в подшипниковом щите со стороны привода.

На тепловозах 2ТЭ25К и 2ТЭ25А периодически при работе на 15-й позиции контроллера с помощью дифференциального манометра контролируют статическое давление воздуха в контрольной точке тягового агрегата — оно должно быть не более 1400 Па, а также статическое давление в контрольных точках тяговых электродвигателей, которое должно быть не более значений, приведенных в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Зависимость величины статического напора охлаждающего воздуха в тяговом электродвигателе ЭДУ-133 от температуры и барометрического давления окружающей среды, Па

Температура окружающей среды, °С	Барометрическое давление, кПа					
	90,66	93,33	96,00	98,66	101,33	104,00
50	129	133	137	141	145	149
40	134	138	142	145	149	153
30	138	142	146	150	154	158
20	143	147	151	155	160	164
10	148	152	156	161	165	170
0	153	158	162	167	171	176
–10	159	164	168	173	178	183
–20	165	170	175	180	185	190
–30	172	177	182	187	192	198
–40	180	185	190	196	201	206
–50	188	193	199	204	210	215

При техническом обслуживании необходимо руководствоваться значениями допустимых размеров и параметров электрических машин.

7.2. Основные неисправности электрических машин

В процессе эксплуатации тяговых коллекторных электрических машин вследствие внешних воздействий толчков, ударов и вибраций возникают износ и неисправности.

В остове появляются:

– поперечные, продольные и поперечно-продольные трещины, особенно в местах крепления кронштейнов сваркой;

– ослабление или повреждения болтов, крепящих главные и добавочные полюса, подшипниковые щиты, шапки моторно-осевых подшипников;

– повреждение резиновых прокладок маятниковых опор тяговых электродвигателей.

Кроме того, на коллекторно-щеточном узле по различным механическим или электромагнитным причинам может возникнуть искрение различной степени интенсивности, вплоть до кругового.

В табл. 7.2 приведены возможные причины возникновения искрения и способы их устранения.

Таблица 7.2

Причины, вызывающие искрение на коллекторе, и способы их устранения

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
Искрят все щетки	Щетки установлены неправильно	Проверить положение щеток по заводским меткам, имеющимся на траверсе
	Щетки в неудовлетворительном состоянии и неправильно установлены в щеткодержателях	Необходимо правильно установить щеткодержатели и щетки. Щетки должны быть тщательно пришлифованы к коллектору мелкой стеклянной шкуркой (применение наждачной бумаги не рекомендуется)
	Щетки имеют неровную обгоревшую поверхность с царапинами, забитыми медной пылью. Края щеток обломаны или обгорели	
	Размеры обойм щеткодержателей не соответствуют размерам щеток (слишком велик или слишком мал зазор между щеткой или обоймой щеткодержателя)	Необходимо установить щетки, указанные в паспорте электрической машины
	Слишком велико расстояние между щеткодержателем и коллектором	Правильно установить щеткодержатели. Расстояние между низом щеткодержателя и коллектора должно быть в пределах 2—4 мм. Регулируется в ТЭД смещением щеткодержателя относительно кронштейна по гребенке

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
	Щеткодержатель слабо закреплен на пальцах траверсы ТЭД	Подтянуть болты, крепящие щеткодержатели к траверсе
	Щетки слабо прилегают к коллектору или имеется чрезмерное нажатие щеток, вызывающее их повышенный износ	Отрегулировать нажатие щеток на коллектор
	Установлены щетки не той марки, которая указана в паспорте машины	Установить щетки, соответствующие предписанию завода-изготовителя
	Нажатие на щетки неодинаково, вследствие чего токи между ними распределены неодинаково	Отрегулировать одинаковое нажатие на все щетки
	Наблюдается повышенная вибрация щеточного аппарата и при резонансе значительно увеличивается искрение	Увеличить жесткость щеточного аппарата
	Главные и добавочные полюса распределены неравномерно	Добиться одинакового распределения полюсов. Оно в ТЭД не должно отличаться более чем на 2 мм
	Несвоевременно проведенная продорожка коллектора	Глубина продорожки должна быть в пределах 1,5—2 мм. После продорожки необходимо снять фаски на коллекторных пластинах
	При холостом ходе машина не искрит, а по мере возрастания нагрузки искрение увеличивается Главные и добавочные полюса чередуются неправильно	Проверить и установить правильное чередование полярности главных и добавочных полюсов
	Неправильная полярность отдельных главных и добавочных полюсов	Устранить неправильную полярность главных и добавочных полюсов
	Короткое замыкание между какими-либо витками добавочных полюсов	Отыскать место замыкания и устранить его

Продолжение табл. 7.2

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
	Плохой контакт отдельных (возможно, плохая пайка) лобовых частей обмотки якоря с «петушками» коллектора	Выполнить качественную пайку лобовых частей якоря с «петушками» коллектора
	Отдельные коллекторные пластины выступили или запали	Обточить коллектор
	Короткое замыкание в якоре	Выполнить перемотку якоря
	Некоторые уравнители отпаялись	Если после того как пайка «петушков» проверена и исправлена, а коллектор обточен, продолжается почернение одних и тех же пластин, то следует проверить пайку уравнителей
	Обрыв в катушке якоря, находящейся между другими катушками	При обрыве в обмотке заменить неисправную катушку
	Ослабла затяжка коллектора, почерневшие пластины коллектора	Затянуть и обточить коллектор, катушку заменить новой
	Коллектор негладкий или бьет. Вся машина вибрирует. Под действием центробежных сил коллектор деформирован; отдельные пластины выступают; затяжка коллектора ослабла	Проверить биение коллектора. Коллектор подтянуть и обточить, изоляцию между пластинами продорожить. Устранить вибрацию машины
	Недостаточная продорожка	Выполнить продорожку коллектора
	Коллектор загрязнен графитовой пылью	Протереть коллектор чистой неволокнистой салфеткой, слегка смоченной бензином, и отшлифовать мелкой стеклянной шкуркой
	Коллектор загрязнен вследствие сильного износа щеток, вызываемого негладкостью коллектора или неподходящими щетками	Неровный коллектор отшлифовать или обточить и продорожить изоляцию между пластинами коллектора; неподходящие щетки заменить новыми

Окончание табл. 7.2

Признаки искрения	Возможная причина	Способы устранения
	Загрязнение возможно из-за небрежной чистки и продувки машины после притирки щеток или шлифовки коллектора, а также плохого ухода за машиной	Коллектор необходимо содержать в чистоте. После каждой притирки щеток и шлифовки коллектора надо тщательно очищать и продувать коллектор и щеточный аппарат
	Щетки расположены неправильно	Необходимо проверить положение щеток
	Щетки установлены не той марки, которая указана в паспорте машины	Установить щетки, указанные в паспорте машины
	Круговой огонь может возникнуть в результате быстрого нарастания тока при переходных процессах, а также в результате образования кругового огня на соседнем параллельно двигателе или при пробое плеча выпрямительной установки	Должна быть правильно отрегулирована система защиты электрооборудования
	Круговой огонь может вызвать режимы ударного включения полного напряжения на предварительно обесточенный тяговый двигатель	Соблюдать режим работы тягового двигателя

Чрезмерный нагрев машины вызывается рядом причин. Перегрузка машины токами, превышающими допустимые значения перегрева, приводит к ускоренному старению изоляции и ограничивает полное использование их мощности. При старении изоляции уменьшается ее электрическая прочность, вследствие чего происходят тяжелые повреждения изоляции тяговых электродвигателей, такие как пробои, межвитковые замыкания обмоток якорей, выплавление припоя из «петушков» коллектора, размотка бандажей и разрушение подшипников якоря. Если нагрев тяговых электродвигателей повторяется и на других электровозах, то это значит, что неправильно рассчитана масса поезда.

При боксовании колесной пары частота вращения якоря тягового электродвигателя резко возрастает. Вследствие этого возника-

ют большие центробежные силы, способные вызвать повреждение валов тяговых электродвигателей, соединительных муфт, вентиляторов, повреждение или ослабление бандажей, выпадение клиньев из пазов якоря и т.д. Кроме того, при повышении частоты вращения якоря заметно усиливается искрение под щетками и создаются условия для кругового огня по коллектору. При восстановлении сцепления боксующей колесной пары частота ее вращения резко уменьшается, вследствие чего накопленный запас кинетической энергии превращается в удар, который передается на зубчатую передачу, подшипники и вызывает их поломку или повышенный износ.

При движении тяжеловесного поезда по затяжному подъему, особенно при трогании с места на крутом подъеме такого поезда или при движении с отключенными тяговыми электродвигателями, токи в них могут превысить допустимые значения. В этом случае такие даже кратковременные перегрузки вызывают повышенное искрение на коллекторе и даже круговой огонь.

При опорно-осевом подвешивании тяговых электродвигателей при взаимодействии колесных пар с рельсами возникают большие динамические усилия, которые через моторно-осевые подшипники передаются на остов, якорь и другие детали. Эти усилия могут вызвать трещины и обрывы проводников, механическое повреждение изоляции, повреждение моторно-осевых и якорных подшипников, нарушение посадки подшипниковых щитов, а также ухудшение коммутации. Иногда встречаются и другие неисправности якорей тяговых электродвигателей, такие как низкое сопротивление изоляции, замыкание коллекторных пластин и пробой изоляции коллектора.

На коллекторе в результате длительной эксплуатации появляются местные выработки, лыски, нарушение нормальной работы щеточного узла и повышенное искрение и даже круговой огонь.

В полюсах и катушках возбуждения встречаются следующие неисправности: замыкание витков и слоев обмоток, низкое сопротивление и пробой изоляции, обрыв и повреждение кабелей, ослабление и разрушение полюсных болтов.

В щеткодержателях тяговых электродвигателей и вспомогательных машин постоянного тока возможны другие неисправности: перекрытие электрической дугой изоляторов кронштейнов, пробой изоляции, излом пружин, износ окон под щетки.

Электрические неисправности могут быть трех видов: короткое замыкание, обрыв электрической цепи и постороннее питание (образно говоря «нет контакта, где он должен быть, и есть контакт, где его не должно быть»). *Короткие замыкания* возникают при соединении друг с другом двух проводников постоянного тока разной полярности или двух или трех фаз переменного тока. В результате короткого замыкания резко снижается сопротивление цепи и возникают недопустимо большие токи, повреждающие провода и включенные в эту цепь электрические аппараты. Причины коротких замыканий различные. Это — загрязнение, перетирание, увлажнение или старение изоляции, атмосферные или коммутационные перенапряжения, попадание на токоведущие части металлических предметов, а также потери полупроводниковыми приборами запирающих свойств. При коротком замыкании увеличивается величина тока до аварийных значений. При несвоевременном срабатывании аппаратов защиты большой ток к.з. может вызвать повреждение электрооборудования и привести к пожару.

При возрастании тока увеличивается величина магнитного потока, возникающего вокруг проводника с током, что приводит к появлению значительных сил, способных повредить подшипники, разрушить бандажи якорей электрических машин, заклинить зубчатую передачу или буксовые подшипники колесных пар, резко снизить частоту вращения роторов электрических машин.

Причинами *обрыва проводов* могут быть их перегибы, сильные натяжения, трения изоляции о металлические предметы, а также обгорания или отпаивания наконечника, сильное окисление контактов и попадание между ними посторонних предметов. Обрывы проводов также приводят к серьезным последствиям, хотя и к менее опасным, чем при коротком замыкании, например, к отключению некоторых тяговых электродвигателей или вспомогательных машин, устройств для поднятия токоприемников, отключаются также некоторые системы защиты. Обрывы проводов силовой цепи можно устранить только в условиях ремонтного депо.

Постороннее питание электрической цепи возникает при повреждении изоляции одного или нескольких проводов и замыкании этим проводом других проводов. При этом происходит включение аппарата или электрической машины, которые не должны включаться при включении той или иной кнопки.

При возникновении коротких замыканий, обрывов проводов, постороннего питания в пути следования локомотивная бригада должна сделать запись в Журнале технического состояния формы ТУ-152 с указанием места аварии. По этой записи в условиях депо подозрительное место тщательно осматривают и по брызгам металла или по возможному запаху горелой изоляции устанавливают причину неисправности и устраняют ее. Для ее обнаружения наряду с визуальным методом применяют различные измерительные приборы, такие как мегомметры, тестеры, осциллографы, также прозвоночные лампы и т.п.

Высокая влажность воздуха ухудшает сопротивление изоляции, часто вызывает ее пробой, а в сочетании с низкой температурой — образует на внутренней поверхности ТЭД иней и даже лед в трещинах изоляции, способный разорвать ее. Особую опасность представляют трещины с накопившейся в ней токопроводящей пылью. Поэтому для повышения надежности и долговечности электрических машин необходимо периодически восстанавливать свойства изоляции методами очистки, сушки и пропитки лаками или компаундами.

Очистку элементов электрических машин выполняют различными способами. Так, после разборки ТЭД остовы и якоря вначале очищают от пыли и грязи, обдувая их в продувочной камере сжатым воздухом. После обдувки якорь и остов очищают вручную, протирая их техническими салфетками или ветошью, смоченными в бензине (при протирке изоляции) или в керосине (при очистке металлических элементов ТЭД).

Обмытый якорь устанавливают в специальной камере и подвергают сушке теплым воздухом. Назначение сушки — восстановление изоляции путем удаления влаги. Для получения теплого воздуха используют специальные калориферы.

В некоторых случаях изоляцию якорей в депо сушат электрическим током. При этом локомотив перемещают по деповским путям на малых позициях контроллера машиниста, при этом слегка подтормаживают колесные пары.

Перед сушкой изоляции обмоток электродвигатель и его составные части продуваются сжатым воздухом, очищаются доступные участки якоря и магнитные системы, щеткодержатели и их пальцы от пыли, замасливания, грязи и других загрязнений.

При низком сопротивлении изоляции сушка ТЭД под тепловозом проводится нагретым сухим воздухом от калориферной установки.

Начинать сушку изоляции необходимо при температуре около 50 °С, постепенно увеличивая до +90—100 °С. Расход воздуха через каждый ТЭД должен составлять от 15 до 20 $м^3$/мин. При сушке обмотки нагреваются постепенно (необходимо поднимать температуру не более чем на 10 °С в течение 1 ч). При быстром нагревании разница в постоянных времени нагрева и в коэффициентах линейного расширения обмотки и активной стали, а также конструктивных частей электродвигателя может привести к повреждениям в виде разрыва изоляции.

Измерение температуры и сопротивления производится в начале сушки через каждые 30 мин, а при установившейся температуре — через 1 ч, при этом замер изоляции производится только мегомметром на 500 В.

Во время сушки сопротивление изоляции обмоток сначала понижается вследствие испарения влаги, а затем повышается и, наконец, становится постоянным или незначительно изменяется в сторону повышения. Ни в коем случае нельзя прекращать сушку при продолжающемся понижении сопротивления изоляции.

При установившемся значении сопротивления изоляции обмоток сушку необходимо продолжать еще не менее 3—5 часов; в течение этого времени сопротивление изоляции не должно меняться.

Во время сушки крышки смотровых люков должны быть закрыты. Для сушки изоляции обмоток внешним обогревом электродвигатель в сборе со снятыми крышками смотровых люков или отдельно якорь, магнитную систему, главный или добавочный полюсы помещают в вентилируемую сушильную камеру с температурой от 100 до 110 °С.

После окончания сушки проверяют сопротивление изоляции мегомметром. Минимальное сопротивление изоляции обмотки якоря, обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов, компенсационной обмотки, которое замеряют при температуре 130—135 °С, должно быть не ниже 1 МОм. Если сопротивление изоляции ниже, то сушку продолжают.

При работе электрических машин происходит их ***механический износ***: изнашиваются подшипники, щетки, рабочая поверхность

коллектора, внутренняя поверхность окон щеткодержателей. При износе щеток образуется графитовая пыль, которая покрывает поверхность кронштейнов щеткодержателей, создавая токопроводящие мостики, что приводит к перебросу электрической дуги. Кронштейны щеткодержателей повреждаются. Переброс возможен и на траверсу щеткодержателей и даже на остов двигателя, что можно обнаружить при осмотре щеткодержателей, траверсы, остова. На щетках возможны сколы рабочей поверхности, появляющиеся вследствие плохого состояния коллектора. Во вспомогательных машинах постоянного тока, которые, как правило, не реверсируются, возможно заедание щетки в окне щеткодержателя. Это приводит к потере контакта щетки с коллектором или увеличивается сопротивление переходного контакта.

При чрезмерном износе якорных подшипников изменяется зазор между якорем и полюсами, что может привести к задеванию якоря о полюса. Происходит повреждение бандажей якоря, их разматывание и в дальнейшем возможно заклинивание тягового электродвигателя.

Из других механических повреждений возможны обрыв болтов полюсов и кронштейнов щеткодержателей, потеря крышек смотрового люка, задир или рассыпание коллектора, ослабление крепления подшипниковых щитов, излом вала якоря, излом деталей щеткодержателей. Некоторые неисправности исправляют в депо, а другие, такие как рассыпание коллектора, устраняют в условиях заводского ремонта.

О повреждении якорных подшипников при эксплуатации чаще всего свидетельствуют следы нагрева крышки подшипника и попадание смазки внутрь остова. Для контроля за исправностью подшипников применяют различные приборы вибродиагностики. Если повреждения значительны, то их можно выявить по просадке вала с помощью пластинчатого или шарикового щупа.

Сушка увлажненной изоляции обмоток. На электрические машины тепловозов и дизель-поездов в процессе эксплуатации воздействуют следующие факторы: солнечная радиация, температура окружающей среды, атмосферные осадки, атмосферное давление, наличие в окружающем воздухе пыли и других загрязнений.

Работа ТЭД при высоких температурах ведет к ускорению старения изоляционных материалов. Высокая температура влияет на

характеристики смазочных материалов, нарушает монолитность сложных узлов, ухудшает физико-механические свойства материалов, применяемых в конструкции ТЭД. В свою очередь, при низких температурах из-за увеличения жесткости пути и количества дефектов рельсов повышается динамическое воздействие на ТЭД, особенно при опорно-осевом подвешивании.

7.3. Техническое обслуживание отдельных узлов и агрегатов

***Техническое обслуживание тяговых электродвигателей* ЭД-118А, ЭД-118Б, ДТК-800КЭ.** При наружном осмотре сначала проверяют исправность действия замков коллекторных люков, болтовые крепления моторно-осевых букс, кожухов зубчатой передачи, главных и добавочных полюсов, подшипниковых щитов, кронштейнов подвески. Внутренние узлы электродвигателей осматривают, как правило, когда электровоз стоит на канаве (с помощью верхнего коллекторного люка осмотр можно произвести без установки электровоза на канаву). Перед осмотром поверхности около коллекторных люков и крышки этих люков тщательно очищают от пыли, грязи, снега и т.д., после чего снимают крышку и осматривают якорь, коллектор, щеткодержатели, щетки, кронштейны и пальцы кронштейнов, расположенные против смотрового люка, а также видимую часть шинного монтажа траверсы и полюсных катушек.

Техническое обслуживание коллекторно-щеточного узла. Нормально работающий коллектор должен иметь полированную блестящую поверхность коричневого оттенка (так называемую «политуру») без царапин, рисок, вмятин, затяжки меди в межламельное пространство и подгаров.

Мягкой слегка смоченной в техническом спирте или бензине салфеткой удаляют грязь и следы смазки. Таким же образом очищают изоляцию переднего конуса, подгоревшие и поврежденные места конуса, зачищают стеклянной шкуркой и окрашивают изоляционной эмалью до получения глянцевой поверхности. Недопустимо применять для протирки материалы, оставляющие жирные следы.

Небольшие царапины, выбоины и подгары на рабочей поверхности коллектора устраняют шлифовальной шкуркой, закрепленной на специальной деревянной колодке, имеющей радиус, близкий радиусу коллектора, и ширину не менее $^2/_3$ длины рабочей поверхности коллектора. Зачистку рекомендуется производить на

вращающем коллекторе. В противном случае это может вызвать местные выработки. Однако шлифовка уничтожает «политуру» и тем самым ухудшает контакт между коллектором и щетками. Поэтому к ней прибегают при крайней необходимости. Вместо шлифовки допускается производить полировку вращающегося коллектора брезентом при помощи деревянной колодки, имеющей радиус, равный радиусу коллектора.

Удаление заусенцев из межламельного пространства коллектора выполняют неметаллической щеткой или кистями, например, капроновыми. При этом чешуйки меди загибают щеткой в ламельное пространство, затем с помощью сжатого воздуха поднимают их вновь; операции повторяют 2—3 раза до излома чешуек меди. Крупные заусенцы от затяжки меди удаляют специальным ножом для снятия фасок.

Для устранения неисправностей в тяговых электродвигателях или в тяговых генераторах после переброса дуги и кругового огня тяговый электродвигатель или тяговый генератор снимают с тепловоза и производят ремонт в соответствии с заводскими инструкциями.

В случае повышенного износа всех щеток или же щеток одной стороны тщательно осматривают коллектор и замеряют его биение. Причиной повышенного износа щеток может быть недостаточно тщательная обработка коллектора или же выступание отдельных коллекторных пластин. Выступание миканитовых пластин устраняют продорожкой коллектора.

Если будет обнаружена неисправность части щеткодержателей или щетки окажутся изношенными, продолжают осмотр остальных щеток и щеткодержателей, проворачивая траверсу. Заменяют щетки, причем на ту марку, которая указана в инструкции завода-изготовителя. После установки щеток выполняют их пришлифовку мелкозернистой шкуркой; применение крупнозернистой шкурки недопустимо. Аналогично выполняют техническое обслуживание тяговых электродвигателей электропоездов. После осмотра тягового электродвигателя смотровые люки закрывают, убеждаются в плотном прилегании крышек к остову и проверяют исправность запирающих устройств. Обращают внимание на целостность брезентовых вентиляционных патрубков, надежность их крепления и плотность прилегания. Не допускаются обрывы и прорези брезентовых патрубков.

Техническое обслуживание тяговых электродвигателей с опорно-рамным подвешиванием включает в себя те же работы, что и при выполнении технического обслуживания тяговых электродвигателей при опорно-осевом подвешивании.

При ТО-2 проверяют надежность крепления крышек коллекторных люков, плотность их прилегания к остову; неисправные уплотнения ремонтируют или заменяют. Определяют температуру нагрева якорных подшипников, которая должна быть не более 80 °С. Проверяют крепление главных и добавочных полюсов, подшипниковых щитов, крышек подшипниковых щитов, целостность брезентовых вентиляционных патрубков, надежность их крепления и плотность прилегания. Обрывы и прорези брезентовых патрубков не допускается.

Техническое обслуживание асинхронных электродвигателей, как тяговых, так и вспомогательных предназначено для проверки его технического состояния, поддержания в чистоте и выполняется без снятия его с электровоза.

Все виды технического обслуживания и текущего ремонта двигателей необходимо совмещать с видами технического обслуживания локомотива.

Сопротивление изоляции цепей электродвигателя относительно корпуса и фазами измеряется мегомметром напряжением 1000 В. Величина сопротивления должна быть:

– не менее 20 МОм в практически холодном состоянии для нового электродвигателя;

– не менее 1,0 МОм в практически холодном состоянии в эксплуатации и перед вводом электровоза в эксплуатацию после длительного отстоя;

– не менее 1,0 МОм в нагретом состоянии.

При ТО-1, ТО-2 производят внешний осмотр и очистку снаружи от пыли и грязи, проверяют на ощупь нагрев статора и подшипниковых щитов, а также крепление двигателей к каркасу и состояние заземления.

Во включенном состоянии проверяют на слух работу электродвигателя, при которой не должно возникать посторонних шумов и стуков.

Техническое обслуживание вспомогательных электрических машин дизель-поездов. При ТО-3 сразу после постановки дизель-поезда на

ремонтную позицию проверяют нагрев (на ощупь или специальными термометрами) крышек подшипниковых щитов электрических машин, температура которых должна быть не более 80 °С.

Электродвигатели осматривают снаружи, обращая особое внимание на выводные кабели, вентиляционные и выхлопные патрубки. Убеждаются в отсутствии трещин в остове, исправном состоянии и надежном креплении выводных кабелей, клиц, а также болтов, крепящих сердечники полюсов; ослабление полюсных болтов не допускается. Не допускается трение выводных кабелей между собой или о какие-либо детали, чрезмерное натяжение кабелей, Проверяют крепление электродвигателя, подшипниковых щитов; ослабление крепления щитов и обрыв болтов не допускается.

Электрические машины осматривают, проверяют их подвеску и крепление, крепление полюсов и шунтов заземления. Очищают сетки вентиляционных отверстий от грязи, при необходимости продувают сжатым воздухом давлением от 0,25 до 0,30 Мпа, проверяют остов и подшипниковые щиты. Трещины в подшипниковых щитах, ослабление крепления щитов и обрыв болтов не допускается.

Открывают крышки коллекторных люков. Проверяют состояние крышек и их уплотнений, замков, плотность прилегания крышек, неисправности устраняют. Проверяют также исправность и крепление корпусов, кронштейнов и пружин щеткодержателей, изоляторов, щеток.

Кронштейны с изоляторами, имеющими повреждения глазури, трещины или ослабления в посадке, заменяют. Кронштейны из пластмассы с закопченной поверхностью зачищают и покрывают электроизоляционной дугостойкой эмалью, а с повреждением пластмассы более 20 % — заменяют.

Щеткодержатели с трещинами, неисправными пружинами, шунтами, разработанными окнами под щетки, ослабшими сухарями пальцев — заменяют.

Щетки, изношенные по высоте более допускаемых норм, имеющие отколы более 10 % контактной поверхности, ослабление заделки или обрыв более 15 % сечения жил шунтов — заменяют. Вновь установленные щетки притирают по коллектору. Установка щеток разных марок на одну электрическую машину не допускается.

Осматривают доступные межкатушечные соединения; ослабшие — закрепляют. Проверяют посадку катушек на сердечники по-

люсов; ослабление посадки катушек не допускается. Осматривают коллектор, вылет изоляционного конуса, бандажи и клинья крепления обмотки якоря. Очищают коллектор от загрязнений капроновой щеткой и протирают смоченной в бензине салфеткой. Устраняют следы перебросов электрической дуги, снимают фаски, зачищают и отшлифовывают коллектор.

Проверяют состояние и крепление вентиляторов. Запрещается эксплуатация электрических машин с ослабшим или поврежденным вентилятором.

Измеряют сопротивление изоляции цепей электродвигателей с высоковольтными аппаратами.

Контрольные вопросы

1. Какие неисправности остова тяговых коллекторных машин возможны в эксплуатации?
2. Каковы причины искрения на коллекторе?
3. Каковы причины нагрева тяговых электрических машин?
4. Какие виды работ выполняют при ТО-1 коллекторных ТЭД?
5. Как производят сушку электрических машин?
6. Какие виды работ выполняют при ТО-2 коллекторных электрических машин?
7. Какие виды работ выполняют при ТО-3 коллекторных электрических машин?

Рекомендуемая литература

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. Утверждены приказом Минтранса России от 21.12.2010 г. № 286. — М.: Трансинфо ЛТД, 2011. — 256 с.

2. Большая энциклопедия транспорта. Том 4. Железнодорожный транспорт. — М.: Большая Российская энциклопедия, 2003. — 559 с.

3. ГОСТ 12232-89. Щетки электрических машин.

4. ГОСТ 21427-83. Сталь электротехническая тонколистовая.

5. ГОСТ 2582-81. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия.

6. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия, исполнения для различных климатических районов, категорий условий эксплуатации, хранения, транспортировки в части воздействия климатических факторов внешней среды.

7. ГОСТ 15543-1-89. Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к климатическим внешним воздействующим факторам.

8. ГОСТ 12.0.003–74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.

9. *Грищенко А.В., Козаченко Е.В.* Новые электрические машины локомотивов: учеб. пособие. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. — 271 с.

10. *Дайлидко А.А.* Электрические машины тягового подвижного состава: учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта. — М.: Желдориздат, 2002. — 404 с.

11. *Дайлидко А.А., Дайлидко О.А.* Электрические машины: учебное иллюстрированное пособие для студентов колледжей и техникумов железнодорожного транспорта. — М.: УМК МПС России, 2002. — 43 с.

12. *Дайлидко А.А.* Метрология, стандартизация и сертификация: учеб. пособие. — М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2009. — 352 с.

13. *Кацман М.М.* Электрические машины: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — 496 с.

14. *Петропавлов Ю.П.* Технология ремонта электроподвижного состава: учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта. — М.: Маршрут, 2006. — 432 с.

15. *Стрекопытов В.В., Грищенко А.В., Кручек В.А.* Электрические передачи локомотивов: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Под ред. В.В. Стрекопытова. — М.: Маршрут, 2003. — 310 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

Дайлидко Антон Антонович

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ТЕПЛОВОЗОВ И ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДОВ

Учебное пособие

Подписано в печать 07.08.2015 г.
Формат 60×84/16. Печ. л. 15,25.
ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте»
105082, Москва, ул. Бакунинская, д.71
Тел.: +7 (495) 739-00-30
e-mail: info@umczdt.ru
http://www.umczdt.ru